



António José Silva Frade

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Análise da injectabilidade do *grout* variando o meio poroso ao longo do escoamento

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques,
Professor Catedrático, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor António Manuel Pinho Ramos
Arguente: Prof. Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar
Vogal: Prof. Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Novembro de 2015

‘Copyright’ António José Silva Frade, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Fernando Henriques, por me ter possibilitado realizar a presente dissertação, pela disponibilidade sempre demonstrada e pela referência de conhecimento e competência que constituiu durante todo o percurso curricular do mestrado.

Ao Mestre Fernando Jorne por todo o apoio, disponibilidade e partilha de conhecimento.

Aos meus colegas Frederico Telha e João Guerreiro na ajuda para a realização dos ensaios experimentais.

A todos os colegas e amigos de mestrado com os quais partilhei bons momentos e tive o prazer de conviver.

Aos meus pais, irmãos e namorada, pelo apoio incondicional prestado a todos os níveis.

Preâmbulo

A presente dissertação foi elaborada no âmbito do projecto de investigação Optimização de caldas para consolidação de alvenarias, (PTDC/ECM/104376/2008) financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia do Ministério da Educação e Ciência, integrando-se no trabalho desenvolvido pela equipa de investigação coordenada pelo orientador desta dissertação, à qual o autor se juntou no período em que esteve a preparar. Por essa razão a dissertação usa metodologias e conhecimentos desenvolvidos anteriormente no desenrolar do projecto e que em alguns casos não foram ainda publicados ou aguardam aceitação nas revistas a que foram submetidos.

Os diferentes horizontes temporais em que se desenvolvem as várias acções que integram o projecto, designadamente as teses de doutoramento em curso, as dissertações de mestrado já terminadas e a conclusão do próprio projecto, levam a que esta situação de utilização de conhecimentos, metodologias e informação ainda não publicados não seja condicionada, sob pena de inviabilizar a conclusão dos trabalhos, cujo âmbito ou duração sejam mais reduzidos. Daí decorre que muita informação não publicada utilizada nesta dissertação seja propriedade intelectual de membros individuais da equipa ou da equipa de investigação em geral. Para clarificação do assunto e para além desta nota, foi utilizada a figura da comunicação particular para referenciar alguma dessa informação, sem prejuízo de existirem situações que possam não estar totalmente identificadas.

Resumo

O envelhecimento do património edificado que constitui a maioria dos centros históricos e urbanos, não só em Portugal, como em toda a Europa, é uma realidade. Parcela significativa destes edifícios é constituída por paredes de alvenaria de pedra em mau estado de conservação. A necessidade crescente de intervenção no sentido de otimizar as respectivas condições de segurança destes edifícios é por isso prioritária.

Uma das técnicas mais comuns, usadas na consolidação de alvenarias antigas e elementos arquitectónicos danificados, é a injeção de *grouts*. A utilização desta técnica tem como finalidade, não só o preenchimento de vazios existentes, de modo a aumentar a compacidade e resistência mecânica do núcleo da estrutura, mas também a criação de uma boa ligação com os panos exteriores, permitindo que a alvenaria recupere o seu comportamento monolítico.

No entanto, é necessário ter em consideração, antes de qualquer intervenção de reabilitação, a compatibilidade entre os materiais originais e os materiais utilizados na intervenção. Deste modo, optou-se pela utilização de um ligante, cuja as propriedades mecânicas, físicas e químicas mais se assemelham aos materiais originais em alvenarias antigas, caso da cal hidráulica.

Outro aspecto de grande importância a ter em conta, na injeção de *grouts*, é o poder de penetração da mistura. Assim, a necessidade de avaliação da eficiência da injeção em diferentes meios porosos conduziu à criação de modelos com diferentes composições que simulassem, com a maior fiabilidade possível, meios porosos encontrados no pano interior de alvenarias antigas.

O presente trabalho incide principalmente na realização de ensaios de injeção, tendo como objectivo a análise da influência da variabilidade do meio poroso ao longo da altura de injeção de *grout*. Foram ainda realizados, de modo a avaliar a qualidade destas injeções, ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons, assim como, a utilização da técnica de tomografia ultra-sónica. A combinação deste ensaio e técnica de análise não-destrutivas revelou-se de grande utilidade na avaliação da morfologia interna dos modelos criados. De forma a conhecer as resistências mecânicas e as respectivas relações com a qualidade de injeção dos meios porosos, realizaram-se ensaios de resistência à tracção por compressão diametral (também designados por *Splitting Tensile Strength Test*). Por fim, na última parte deste trabalho, de modo a simular os testes de injeção realizados anteriormente em laboratório, foi usado um modelo analítico tendo como ponto de partida a teoria de fluxo laminar viscoso através de meios porosos, com base na lei de Darcy.

Termos-chave: injeção de *grout*, meio poroso, ultra-sons, tomografia ultra-sónica, ensaios mecânicos, modelo analítico

Abstract

The aging of the built heritage which is the most historical and urban centers is a reality, not only in Portugal but in all Europe. A significant portion of these buildings consists of stone masonry walls in bad condition. The growing need intervention in order to optimize the conditions of safety of these buildings is therefore a priority.

One of the most common techniques used in the consolidation of ancient masonry and damaged architectural elements is the injection grouts. This technique aims to fill existing voids to increase the compactness and strength of the core structure. Moreover, it also creates a good bond with the outer panels, allowing the masonry recover its monolithic behavior.

However, it is necessary to take into consideration that before any rehabilitation intervention, the compatibility between the original materials and the materials used in the intervention. Therefore, it was decided to use a binder, whose mechanical, physical and chemical properties most resemble the original materials in old masonry, the hydraulic lime.

Another important aspect to take into account, in injection grouts, is the penetrating power of the mixture. The necessity of evaluating the efficiency of injection in different porous media has led to the creation of models with different compositions that simulate, as reliably as possible, porous media found inside old masonry.

This work focuses mainly on carrying out injection tests, with the aim of analyzing the influence of the variability of the porous medium along the grout injection height. We also carried out ultrasonic testing and use of ultrasonic tomographic technique. The combination of these two non-destructive analysis techniques proved to be very useful in assessing internal morphology of the models. The samples were submitted to tensile strength tests by diametrical compression (also called Splitting Tensile Strength Test) to determine the mechanical strength and its relationship with the quality of injection of different porous media. The last part of this work was to use an analytical model taking as its starting point the viscous laminar flow theory through porous media, based on Darcy's law to simulate the injection tests previously performed in the laboratory.

Keywords: Injection grout, porous medium, ultrasound, ultrasonic tomography, mechanical tests, analytical model

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento do Tema.....	1
1.2. Objectivos.....	2
1.3. Organização e estrutura da Dissertação.....	2
2. ANÁLISE DO CONHECIMENTO	5
2.1. Injecção de <i>grout</i>	5
2.2. Reologia	7
2.2.1. Noções gerais de reologia.....	7
2.2.2. Classificação dos fluidos	8
2.2.3. Propriedades do <i>grout</i> no estado fresco.....	9
2.3. Superplastificantes.....	11
2.4. Influência do meio poroso na penetrabilidade do <i>grout</i>	13
2.4.1. Capacidade de penetração	13
2.4.2. Avaliação da penetrabilidade do <i>grout</i>	14
2.4.3. Uso da lei de Darcy para modelar os ensaios de injecção	15
2.4.4. Teoria da frente de resistência.....	16
3. CAMPANHA EXPERIMENTAL	19
3.1. Estudo do <i>grout</i>	19
3.1.1. Composição do <i>grout</i>	19
3.1.2. Procedimento de mistura	21
3.2. Estudo do meio poroso	22
3.2.1. Materiais estudados	22
3.2.2. Ensaios realizados no estado fresco	26
3.2.2.1. Ensaio de injecção.....	26
3.2.3. Ensaio realizados no estado endurecido	27
3.2.3.1. Ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons	27
3.2.3.2. Ensaio de resistência à tracção por compressão diametral.....	31
3.2.3.3. Tomografia ultra-sónica.....	33
4. INFLUÊNCIA DO MEIO POROSO NA INJECCÃO	35
4.1. Introdução.....	35
4.2. Análise do fluxo de <i>grout</i> no tempo de injecção em amostras com meio poroso seco	36
4.2.1. Amostra uniforme (tipo1).....	36
4.2.2. Amostras com fracções dispostas perpendicularmente à direcção do escoamento (tipo2).....	37
4.2.3. Amostras com fracções intermédias dispostas paralelamente à direcção do escoamento (tipo3).....	42

4.3.	Análise do fluxo de <i>grout</i> no tempo de injeção em amostras com o meio poroso pré-humedecido.....	45
4.4.	Análise do fluxo de massa.....	47
4.4.1.	Amostras com meio poroso seco.....	47
4.4.2.	Amostras com meio poroso pré-humedecido	49
4.5.	Avaliação da consolidação do <i>grout</i> nas diferentes amostras	50
4.5.1.	Ensaio de ultra-sons Vs. Ensaio de resistência à tracção por compressão diametral	51
4.5.1.1.	Amostras com fracções dispostas perpendicularmente à direcção do escoamento (tipo2).....	51
4.5.1.2.	Amostras com fracções dispostas paralelamente à direcção do escoamento (tipo3)	55
4.6.	Tomografia ultra-sónica	57
4.6.1.	Amostras com fracções dispostas perpendicularmente à direcção do escoamento (tipo2).....	57
4.6.2.	Amostras com fracções dispostas paralelamente à direcção do escoamento (tipo3).....	60
5.	MODELAÇÃO ANALÍTICA DOS ENSAIOS DE INJEÇÃO	65
5.1.	Introdução.....	65
5.2.	Princípios básicos do fluxo laminar através do meio poroso	65
5.3.	Validade teórica da lei de Darcy na modelação dos ensaios de injeção	66
5.4.	Uso da lei de Darcy na modelação dos ensaios de injeção	66
5.5.	Inadequação parcial da lei de Darcy na modelação dos ensaios de injeção	67
5.6.	Teoria da frente de resistência aplicada aos ensaios de injeção.....	70
5.7.	Considerações finais.....	71
6.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	73
	BIBLIOGRAFIA	77

Índice de Quadros

Quadro 2.1 – Resumo dos requisitos para assegurar a qualidade das caldas de injeção	7
Quadro 3.1 – Características da cal hidráulica HL5.....	19
Quadro 3.2 – Densidade e finura da cal HL5 usando o permeâmetro Blaine	20
Quadro 3.3 – Caracterização química da cal HL5 de acordo com os resultados XRF.....	20
Quadro 3.4 – Características do superplastificante	21
Quadro 3.5 – Composição do <i>grout</i> de injeção	21
Quadro 3.6 – Dimensão das partículas de areia	22
Quadro 3.7 – Composição dos diferentes meios porosos.....	23
Quadro 3.8 – Características dos meios porosos	24
Quadro 3.9 – Permeabilidade (k) dos diferentes meios porosos	25
Quadro 4.1 – Condições de penetrabilidade das partículas sólidas do grout no meio poroso.....	41
Quadro 4.2 – Relação (n) entre o tamanho das partículas sólidas do <i>grout</i> (d) e um diâmetro de canais a ser injectado (W_{nom}), nos meios (fino) e (Médio+Fino).....	42
Quadro 4.3 – Resultados dos ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral nas do (tipo2) e na amostra uniforme (G,G,G) (tipo1)	52
Quadro 4.4 – Resultados dos ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral nas amostras do (tipo2).....	54
Quadro 4.5 – Resultados dos ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral nas amostras do (tipo3).....	56
Quadro 5.1 – Número de Reynolds das várias fracções	66
Quadro 5.2 – Valores de frente de resistência nas amostras	71

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Técnica de consolidação estrutural: injeção de <i>grout</i>	5
Figura 2.2 – Curvas de fluxo para diferentes tipos de fluidos.....	9
Figura 2.3 – Representação esquemática dos fenómenos de exsudação e segregação.....	11
Figura 2.4 – Efeito do superplastificante na floculação das partículas de um <i>grout</i>	12
Figura 2.5 – Formação de aglomerado flocular: na entrada do vazio (1), no interior do vazio (2).....	13
Figura 2.6 – Área disponível entre as partículas do meio poroso para um fluido newtoniano (água) e para um fluido binghamiano (<i>grout</i>)	14
Figura 3.1 – Distribuição da granulometria da cal HL5	20
Figura 3.2 – Areia: Quatro dimensões diferentes (grosso, médio, fino e mais fino).....	22
Figura 3.3 – Areia: Curva granulométrica do meio poroso.....	23
Figura 3.4 – Ensaio de permeabilidade. Esq.: Modelo real utilizado; Dir.: Dispositivo adoptado para medição da permeabilidade do meio poroso	24
Figura 3.5 –Fluxo de água [m^3/s] vs Pressão [bar] nas amostras com fracção intermédia dividida horizontalmente	25
Figura 3.6 –Fluxo de água [m^3/s] vs Pressão [bar] nas amostras com fracção intermédia dividida verticalmente	25
Figura 3.7 – Esquema representativo do método de injeção	26
Figura 3.8 – Modelo real do método de injeção	27
Figura 3.9 – Medição efectuada num provete inteiro (esq.) e numa fatia (dir.) através do método por transmissão directa	28
Figura 3.10 – Esquema da malha de ensaio de ultra-sons de provete inteiro: vista de topo (esq.) e corte 1-1' (dir.)	29
Figura 3.11 – Esquema representativo da localização dos cortes efectuados nos provetes	29
Figura 3.12 – Corte do provete.....	30
Figura 3.13 – Esquema da malha de ensaio de ultra-sons de em cada fatia inteiro: vista de topo (esq.) e vista lateral (dir.)	30
Figura 3.14 – Medição das dimensões da fatia: diâmetro (esq.) e espessura (dir.)	31
Figura 3.15 – Mecanismo de rotura de um provete submetido ao ensaio de resistência à tracção por compressão diametral	31
Figura 3.16 – Aspecto de uma fatia após um ensaio de resistência à tracção por compressão diametral	32
Figura 3.17 – Sistema de ensaio de resistência à tracção por compressão diametral	32
Figura 3.18 – Exemplo de tomograma ultra-sónico de um provete obtido com o GEOTOM (esq.) e tomograma do mesmo provete melhorado com o SURFER (dir.)	33

Figura 4.1 – Esquema representativo da disposição do meio poroso nas amostras	35
Figura 4.2 – Esquema representativo da constituição das amostras analisadas	36
Figura 4.3 – Disposição do meio poroso na amostra uniforme (tipo1)	36
Figura 4.4 – Comportamento do fluxo de <i>grout</i> ao longo do tempo de injeção na amostra uniforme correspondentes ao (tipo1)	37
Figura 4.5 – Disposição do meio poroso nas amostras do (tipo2).....	38
Figura 4.6 – Comportamento do fluxo de <i>grout</i> ao longo do tempo de injeção nas amostras correspondentes ao (tipo2)	38
Figura 4.7 – Comportamento do fluxo de <i>grout</i> ao longo do tempo de injeção nas amostras correspondentes ao (tipo2)	40
Figura 4.8 – Interrupção do fluxo de <i>grout</i> durante a injeção na amostra (G,M+f,G)	40
Figura 4.9 – Disposição do meio poroso nas amostras do (tipo3).....	42
Figura 4.10 – Comportamento do fluxo de <i>grout</i> ao longo do tempo de injeção nas amostras correspondentes ao (tipo3)	43
Figura 4.11 – Progressão do <i>grout</i> na amostra (G,G.F,G)	43
Figura 4.12 – Exemplo de bloqueio ocorrido durante a injeção nas amostras (G,G.f,G) e (G,M.f,G)	44
Figura 4.13 – Comportamento do fluxo de <i>grout</i> ao longo do tempo de injeção nas amostras correspondentes ao (tipo2) com meio poroso seco e pré-humedecido	45
Figura 4.14 – Bloqueio ao fluxo de <i>grout</i> ocorrido durante a injeção nas amostras (G,M+f,G) (esq.), (G,G.f,G) e (G,M.f,G) (dir.), com o meio poroso seco e pré-humedecido.....	46
Figura 4.15 – Comportamento do fluxo de <i>grout</i> ao longo do tempo de injeção nas amostras correspondentes ao (tipo2 e 3) com meio poroso seco e pré-humedecido	47
Figura 4.16 – Massa de <i>grout</i> injectada ao longo do tempo de injeção na amostra uniforme (G,G,G) e nas amostras correspondentes ao (tipo2).....	48
Figura 4.17 – Massa de <i>grout</i> injectada ao longo do tempo de injeção nas amostras correspondentes ao (tipo3)	49
Figura 4.18 – Massa de <i>grout</i> injectada nas amostras com meio poroso seco e pré-humedecido.....	50
Figura 4.19 – Aspecto das faces superiores das fatias correspondentes à base, meio e topo das amostras (G,G,G), (G,M,G), (G,F,G) e (F,G,F), após corte dos cilindros.....	51
Figura 4.20– Aspecto das faces superiores das fatias correspondentes à base, meio e topo das amostras (G,M+F,G) e (G,M+f,G), após corte dos cilindros	54
Figura 4.21 – Aspecto das faces superiores das fatias correspondentes à base, meio e topo das amostras (G,G.M,G), (G,G.F,G), (G,G.f,G), (G,M.F,G) e (G,M.f,G), após corte dos cilindros	55
Figura 4.22 – Tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras (G,G,G), (G,M,G), (G,F,G), (F,G,F).....	57
Figura 4.23 – Tomogramas 3D (dir.) das amostras (G,G,G), (G,M,G), (G,F,G) e (F,G,F)	59

Figura 4.24 – Tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras (G,M+F,G) e (G,M+f,G)	59
Figura 4.25 – Amostra (G,M+f,G): fotografia (esq.) e tomograma 3D (dir.) da amostra	60
Figura 4.26 – Tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras (G,G.M,G), (G,G.F,G) e (G,G.f,G)	60
Figura 4.27 – Amostra (G,G.f,G): fotografia (esq.) e tomogramas 3D (dir.) da amostra.....	62
Figura 4.28 – Tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras (G,M.F,G) e (G,M.f,G)	62
Figura 4.29 – Amostra (G,M.f,G): fotografia (esq.) e tomograma 3D (dir.) da amostra	63
Figura 5.1 – Comportamento do fluxo de <i>grout</i> ao longo do tempo de injeção nas amostras (G,G,G), (G,F,G) e (F,G,F), tendo como base a lei de Darcy	67
Figura 5.2 – Comportamento do fluxo de <i>grout</i> ao longo do tempo de injeção nas amostras (G,M+F,G) e (G,M+f,G), tendo como base a lei de Darcy	68
Figura 5.3 – Comportamento do fluxo de <i>grout</i> ao longo do tempo de injeção nas amostras (G,G.M,G), (G,G.F,G) e (G,M.F,G), tendo como base a lei de Darcy.....	69
Figura 5.4 – Comportamento do fluxo de <i>grout</i> ao longo do tempo de injeção nas amostras (G,G.f,G) e (G,M.f,G), tendo como base a lei de Darcy	70

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do Tema

Grande parte do património edificado constituinte dos mais variados centros históricos e urbanos do mundo, encontra-se envelhecido. Deste modo, surge a preocupação em manter a utilização dos mesmos, garantindo as melhores condições de habitabilidade, segurança e conforto, preservando assim o seu valor histórico, cultural e arquitectónico.

Tendo em conta que a grande maioria destes edifícios é constituída por paredes de alvenaria de pedra em mau estado de conservação, as acções de consolidação são cada vez mais frequentes. Uma das técnicas mais comuns usadas na consolidação de alvenarias antigas e elementos arquitectónicos danificados, é a injeção de *grouts*. A utilização desta técnica tem sido considerada no sentido de melhorar o comportamento estrutural da alvenaria, particularmente as resistências à compressão, à flexão e ao corte. Sendo a sua eficácia comprovada por diversas investigações realizadas nas últimas duas décadas [(Binda et al., 2003a), (Binda et al., 2001), (Brás & Henriques, 2012)]. É ainda importante ter em consideração, antes de qualquer intervenção de reabilitação, a compatibilidade entre os materiais originais e os materiais utilizados na intervenção. Existe uma grande quantidade de exemplos de danos causados por uma aplicação incorrecta de materiais. O uso do cimento em intervenções de reabilitação em edifícios históricos pode causar sérias anomalias devido à elevada resistência mecânica, elevado módulo de elasticidade e reduzida permeabilidade deste material comparativamente aos materiais originais. O maior teor de sais solúveis presentes no cimento, podem também ser prejudiciais. Uma vez que, estes sais não só originam camadas pouco estéticas nas superfícies do edifício, como podem desenvolver grandes pressões devido à cristalização desses sais, danificando o edifício (Matos, 2013).

Deste modo, optou-se pela utilização de um ligante, cuja as propriedades mecânicas, físicas e químicas mais se assemelham aos materiais originais em alvenarias antigas, caso da cal hidráulica.

Do ponto de vista de injectabilidade, a qualidade das injeções está relacionada com a capacidade de escoamento da mistura, um *grout* deve apresentar fluidez e capacidade de penetração uniforme do meio poroso injectado. Diversos factores, quer de carácter intrínseco (granulometria da componente sólida da mistura), quer de carácter extrínseco como a morfologia do suporte e dos seus materiais constituintes (granulometria, superfície específica) influenciam o poder de penetração do *grout*. Com o objectivo de avaliar a influência da variabilidade do meio poroso, na penetrabilidade do *grout*, foram realizados, à semelhança de anteriores investigações [(Brás & Henriques, 2012), (Gil, 1995), (Kalagri et al., 2010), (Van Rickstal et al., 2003)], ensaios de injectabilidade recorrendo a modelos simplificados. Assim, diferentes fracções constituintes do meio poroso foram dispostas de várias formas, permitindo o estudo de três tipos de casos particulares de heterogeneidade em relação

ao fluxo de *grout*.

Posteriormente, a qualidade das injeções do ponto de vista da injectabilidade foram avaliadas através da realização de ensaios não-destrutivos, nomeadamente o ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons e a técnica de tomografia ultra-sónica. A análise conjunta destes dois métodos possibilita uma avaliação da morfologia estrutural interna dos modelos criados, permitindo a obtenção de informações quantitativas e qualitativas sobre os meios porosos estudados.

Seguidamente, de forma a conhecer as resistências mecânicas e as respectivas relações com a qualidade de injeção dos diferentes meios porosos, foram ainda efectuados ensaios de resistência à tracção por compressão diametral (*Splitting Tensile Strength Test*) das amostras.

Foi ainda estudado um modelo analítico tendo como ponto de partida a teoria de fluxo laminar viscoso através de meios porosos, com base na lei de Darcy, de modo a simular os testes de injeção realizados anteriormente em laboratório.

De salientar que a campanha experimental efectuada na presente dissertação foi elaborada em concomitância com a tese de doutoramento do Mestre Fernando Jorne, e surge na sequência de outras injeções de *grout* realizadas em diferentes meios porosos no contexto desse estudo.

1.2. Objectivos

A presente dissertação tem como objectivo principal a análise da injectabilidade do *grout* variando o meio poroso ao longo do escoamento. Durante este estudo, procurou-se ainda avaliar a eficiência das injeções nos diferentes meios porosos recorrendo a ensaios não-destrutivos, nomeadamente através do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons e da técnica de tomografia ultra-sónica.

Pretendeu-se, igualmente, avaliar as características mecânicas das amostras, através da realização do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral (*Splitting Tensile Strength Test*).

Por fim, foi utilizado um modelo analítico desenvolvido por Gil e Van Rickstal [(Gil, 1995), (Van Rickstal, 2000)], tendo como ponto de partida a teoria de fluxo laminar viscoso através de meios porosos, com base na lei de Darcy. Este estudo teve como objectivo a simulação dos ensaios de injeção realizados anteriormente em laboratório.

1.3. Organização e estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em seis capítulos, visando o primeiro capítulo o enquadramento do tema, os objectivos e a organização e estrutura do trabalho.

O segundo capítulo consiste numa abordagem teórica acerca dos parâmetros em estudo que

influenciam a injeção de *grout*, baseada em estudos e resultados experimentais já existentes.

O terceiro capítulo diz respeito à apresentação da campanha experimental deste estudo, com a identificação e selecção dos diversos materiais utilizados na composição do *grout*, e na constituição dos meios porosos. É ainda feita uma apresentação dos ensaios laboratoriais efectuados, incluindo a descrição dos equipamentos utilizados.

No quarto capítulo é feita uma análise à influência do meio poroso ao longo da altura de injeção. São ainda analisados os resultados referentes aos ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons e tomografia ultra-sónica, e dos ensaios de resistência à tracção por compressão diametral.

O quinto capítulo aborda um modelo analítico desenvolvido por Gil e Van Rickstal [(Gil, 1995), (Van Rickstal, 2000)] dos ensaios de injeção, onde são comparados os resultados obtidos entre o método analítico com os obtidos experimentalmente no quarto capítulo.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho e sugerem-se alguns desenvolvimentos futuros no contexto da temática abordada no presente trabalho.

Finalmente, é apresentada a bibliografia.

2. ANÁLISE DO CONHECIMENTO

2.1. Injecção de *grout*

A técnica de injecção de *grout* (Figura 2.1) pode ser definida como uma técnica de reforço estrutural que consiste na injecção de um *grout* fluido de cal hidráulica, base cimentícia ou de ligante orgânico, através de furos previamente realizados nos panos exteriores da alvenaria, para preenchimento de vazios interiores existentes no núcleo da estrutura (Van Rickstal, 2000). Constitui uma das técnicas mais comuns usadas na consolidação de alvenarias antigas e elementos arquitectónicos danificados, permitindo uma melhoria das propriedades mecânicas em consequência de um aumento da coesão adquirida através da reparação de fracturas e áreas com perda de material (Matos, 2013).

Baseia-se numa solução de reforço passiva e irreversível, visto não permitir remover ou substituir o material injectado sem danificar a alvenaria. No entanto, trata-se de uma solução de reabilitação estrutural em que a intervenção é invisível, visto permitir a preservação do aspecto exterior da parede, sendo uma técnica particularmente indicada e frequentemente utilizada em edifícios de reconhecido valor histórico e/ou arquitectónico, sempre que seja necessário intervir e preservar o aspecto original [(Luso, 2012), (Guerreiro, 2014)].

A injecção é realizada a baixa pressão ou apenas com recurso à acção da gravidade. A introdução na alvenaria de um ligante no estado líquido irá permitir uma boa ligação entre todos os constituintes, melhorando significativamente a capacidade de carga da estrutura após o endurecimento do *grout* introduzido. A alvenaria recupera o seu comportamento monolítico e a sua resistência mecânica global aumenta [(Ignoul et al., 2005), (Guerreiro, 2014)]. Esta técnica é mais eficaz se no elemento a intervir existir uma rede satisfatória de vazios intercomunicantes, ou seja, o que se designa por “porosidade aberta” (Matos, 2013). Sempre que possível, a injecção deverá ser executada dos dois lados da alvenaria e preferencialmente ao longo de fendas já existentes, em orifícios ligeiramente inclinados, não coincidentes nas duas faces.

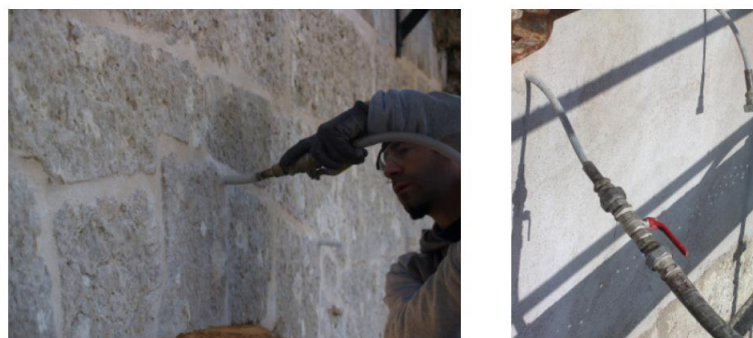


Figura 2.1 – Técnica de consolidação estrutural: injecção de *grout* (Brás, 2011)

As caldas de injeção ou “*grouts*”, em inglês, podem definir-se como uma suspensão aquosa constituída por dois componentes básicos: ligante e água. Para além destes componentes, acrescentam-se frequentemente à sua composição, pequenas quantidades de aditivos, com objectivo de controlar as características do *grout* no estado fresco, sobretudo para uma acção de regulação das propriedades reológicas.

As caldas de injeção têm vindo a ser usadas em trabalhos de reparação e consolidação, pois têm a vantagem de reestabelecer a continuidade, coesão e resistência dos elementos estruturais danificados sem alterar a sua morfologia e o equilíbrio de forças [(Kalagri et al., 2010), (Matos, 2013)]. São normalmente aplicadas por injeção sob pressão controlada, daí a sua denominação mais corrente – caldas de injeção (Luso, 2012).

O desempenho do *grout* de injeção no meio poroso, designadamente a capacidade de preenchimento dos vazios, a segregação, a retracção e as reacções químicas e físicas entre o *grout* e os materiais existentes, são afectados por determinados parâmetros, incluindo o teor e tipo de ligante, a dosagem e tipo de aditivos, a relação água/ligante, a temperatura da água, o tempo e sequência da mistura, bem como as condições de cura, particularmente a humidade e temperatura ambiente .

Antes da intervenção, deve-se ainda dar prioridade, ao estudo das propriedades da calda de injeção, nomeadamente à questão da compatibilidade física e química entre esta e os materiais originais. Segundo alguns autores [(Brás et al., 2012), (Valluzzi, 2005)], *grouts* que apresentem na sua constituição, ligantes de cal hidráulica são potencialmente mais compatíveis, devido à maior proximidade das propriedades químicas, físicas e mecânicas com os materiais antigos, quando comparados com aqueles à base de cimento puro ou resinas orgânicas, melhorando assim a qualidade da intervenção.

As especificações do *grout* envolvem ainda um conhecimento sobre a capacidade de escoamento dentro do núcleo da alvenaria (Jorne et al., 2015a). A eficácia de uma injeção de *grout* depende não só das características da mistura, mas também do conhecimento do tipo de parede (Valluzzi, 2005). Assim, a capacidade de penetração do *grout* depende de diversos factores quer de carácter intrínseco (por exemplo a granulometria da componente sólida da suspensão), quer de carácter extrínseco como a morfologia do suporte (absorção/adsorção) e dos seus materiais constituintes (granulometria, superfície específica) (Guerreiro, 2014).

No Quadro 2.1, são definidas as principais propriedades para a caracterização das caldas de injeção e que devem ser consideradas para garantir a eficiência desta técnica (Luso, 2012).

Quadro 2.1 – Resumo dos requisitos para assegurar a qualidade das caldas de injeção (adaptado de (Luso, 2012))

Requisitos Reológicos	<ul style="list-style-type: none"> – Pretende-se fluidez durante o processo de injeção e capacidade de penetração uniforme de modo a que haja um completo preenchimento dos vazios de igual forma (injectabilidade – propriedades caracterizadas pela homogeneidade, ausência de grumos, com granulometria inferior à dimensão dos vazios a preencher, baixa viscosidade, baixo ângulo de contacto, etc.); – Ausência de segregações (para evitar heterogeneidades); – Exsudação deve ser mínima (para diminuir presença de vazios quando a mistura estiver no estado endurecido).
Requisitos Químicos	<ul style="list-style-type: none"> – Deve ter características químicas estáveis no tempo, isto é, ser capaz de formar ligações químicas fortes com o material existente, através de reacções irreversíveis; – Deve ter resistência aos sais de sulfato, de modo a evitar a formação de produtos expansivos e eflorescências.
Requisitos Físicos	<ul style="list-style-type: none"> – O tempo de início de presa deve ser adequado ao tempo necessário à execução da injeção; – As propriedades higroscópicas devem ser caracterizadas por insolubilidade em água e estabilidade volumétrica na presença de humidade; – Deve possuir baixa retracção.
Requisitos Mecânicos	<ul style="list-style-type: none"> – Deve ter características mecânicas e de rigidez similares aos materiais originais ou apenas ligeiramente superiores; – Deve ter boa e adequada aderência ao suporte para o bom funcionamento do conjunto.

2.2. Reologia

2.2.1. Noções gerais de reologia

A reologia é, por definição, a ciência que estuda o escoamento e a deformação dos materiais.

No campo, a reologia de um *grout* é frequentemente caracterizada pela sua trabalhabilidade, influenciando parâmetros relacionados com a aplicação da mistura, tais como: facilidade de injeção, estabilidade, durabilidade e desenvolvimento de resistências mecânicas.

Desta forma, a reologia e o conhecimento das propriedades reológicas das pastas, argamassas ou dos betões feitos com cimento ou cal, deve ser seriamente tida em conta pelos utilizadores, adquirindo hoje cada vez mais importância na indústria da construção.

2.2.2. Classificação dos fluidos

i) *Fluido Newtoniano*

O fluido Newtoniano é aquele em que a viscosidade não se altera com a aplicação de uma taxa de corte nem apresenta propriedades elásticas, embora varie com a temperatura e a pressão (Figura 2.2). Muitos líquidos apresentam um comportamento newtoniano para uma gama larga de taxas de corte, e muitos mais para reduzidas gamas de taxa de corte. Os líquidos mais comuns que apresentam um comportamento newtoniano são, por exemplo: a água, óleos lubrificantes, uma gama alargada de solventes, hidrogénio e oxigénio (Matos, 2013).

ii) *Fluido não-Newtoniano*

Os fluidos não-Newtonianos são aqueles para os quais a viscosidade depende da taxa de corte aplicada à amostra e não do tempo de corte. Isto significa que a amostra não tem uma viscosidade constante, variando com a velocidade de corte. Esta viscosidade é chamada viscosidade aparente.

Os fluidos não-Newtonianos podem ser de três tipos: os reofluidificantes (“shear thinning” em inglês), reoespesantes (“shear-thickening”) e ainda um terceiro, o fluido de Bingham (Figura 2.2), dependendo da curva tensão de corte vs taxa de corte. O fluido reofluidificante é aquele cuja viscosidade decresce com o aumento da taxa de corte. Para um fluido reoespesante a viscosidade aumenta com o aumento da taxa de corte. E por último, um fluido de Bingham, corresponde a um material que só se deforma a partir de um determinado valor crítico chamado tensão de cedência (τ_0 – “yield stress”, em inglês), comportando-se depois como um fluido Newtoniano (Matos, 2013).

Segundo Toumbakari (Toumbakari, 2002), de acordo com os valores da relação água/ligante normalmente utilizados na composição do *grout*, este pode ser considerado um fluido com um comportamento viscoelástico não-Newtonianos (mais propriamente como um fluido binghamiano) [(Brás, 2011), (Baltazar et al., 2013), (Telha, 2015)].

iii) *Comportamentos transientes*

Como já referido, assume-se que para uma dada taxa de corte corresponde um valor de tensão de corte e de viscosidade e que esses valores não sofrem qualquer mudança enquanto a taxa de corte for constante. No entanto, existem casos em que para uma taxa de corte a viscosidade e a tensão de corte podem aumentar ou diminuir com o tempo. Alterações que podem ser reversíveis ou irreversíveis (Matos, 2013).

A tixotropia (Figura 2.2) é um desses comportamentos, que pode ser entendida como um

decréscimo contínuo da viscosidade quando aplicada uma tensão a um líquido e este flui, estando previamente em repouso, e o recuperar dessa viscosidade quando o líquido deixa de fluir. O comportamento inverso, aumento gradual da viscosidade quando sujeito a uma tensão, seguido da recuperação após a retirada da tensão, é designado por tixotropia negativa ou anti-tixotropia.

A tixotropia pode ser quantificada a partir de ciclos de fluxo, em que a área no interior do ciclo de fluxo pode ser entendida como a energia necessária para desagregar a estrutura do material (Matos, 2013).

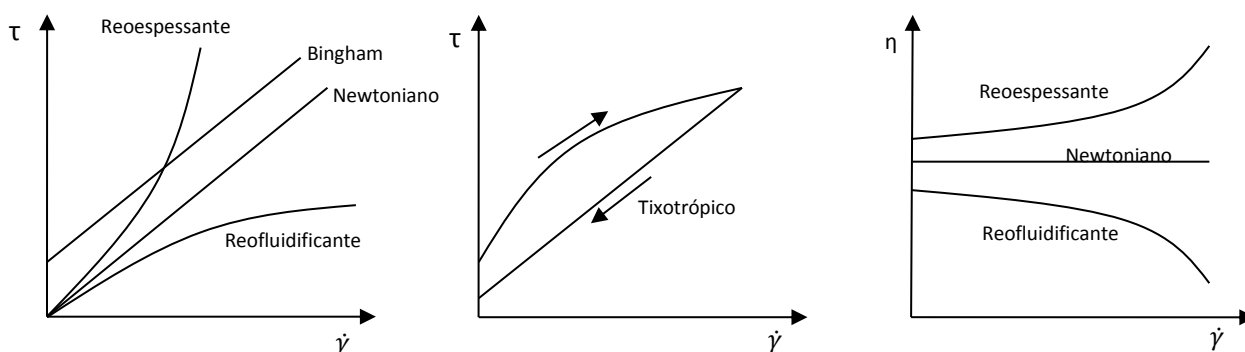


Figura 2.2 – Curvas de fluxo para diferentes tipos de fluidos (Matos, 2013)

2.2.3. Propriedades do *grout* no estado fresco

Do ponto de vista da injectabilidade, a qualidade das injeções está relacionada com a capacidade de escoamento da mistura no meio poroso. Portanto, é possível estabelecer uma relação entre o comportamento reológico do *grout* e as suas propriedades no estado fresco (Guerreiro, 2014).

Seguidamente, apontam-se algumas das propriedades mais importantes utilizadas no estudo do *grout* fresco, tais como a fluidez, estabilidade (segregação/exsudação) e capacidade de retenção de água.

i) *Fluidez*

Durante o processo de injeção, um *grout* deve apresentar fluidez e capacidade de penetração uniforme do meio poroso injectado. Entende-se por fluidez a capacidade do material permanecer, por tempo suficiente, no estado fluido, enquanto ocorre a difusão homogênea das cavidades (Valluzzi, 2000). De acordo com (Vintzileou, 2006) esta propriedade depende essencialmente da quantidade de água presente na amassadura, da forma, natureza, distribuição granulométrica e superfície específica das partículas, assim como, do método de mistura do *grout*.

O comportamento reológico do *grout* fresco surge associado à fluidez, apresentando uma

enorme relevância na injectabilidade do mesmo. Para que esta ocorra adequadamente, é fulcral garantir que o *grout* apresente facilidade em fluir, entre as fissuras e os vazios da alvenaria, ao longo do processo de injeção. Do ponto de vista reológico, a avaliação dessa capacidade pressupõe a determinação de pelo menos duas grandezas fundamentais: a tensão de cedência e a viscosidade plástica do *grout* de injeção (Guerreiro, 2014).

A tensão de cedência ou tensão limite de escoamento pode ser interpretada como a tensão que é necessária exceder para o escoamento se iniciar. Esta grandeza permite perceber a facilidade com que o *grout* se começa a deformar, uma vez que representa o valor crítico necessário para que tal se verifique (Roussel, 2007). Ao passo que, a viscosidade é definida como a resistência ao fluxo, uma vez este iniciado. Um valor elevado de viscosidade plástica, que resulta das interações entre as partículas coloidais excessivas de suspensão, origina um fluxo muito mais difícil (Baltazar et al., 2013).

Ambas as grandezas, permitem diferenciar *grouts* que oferecem grande resistência ao escoamento (difíceis de bombear) de outros facilmente trabalháveis.

ii) Estabilidade

A estabilidade de um *grout* constitui um objectivo fundamental na garantia das mesmas propriedades em todos os locais no seio do material, aquando a sua evolução do estado fresco para o estado endurecido (Toumbakari et al., 2005). Ao longo do processo de injeção a mistura deverá possuir a capacidade de manter uma distribuição de partículas uniforme. De acordo com a sua natureza, pode-se definir o *grout* como o conjunto de partículas sólidas (de ligante) dispersas em água, no qual existe uma conectividade do conjunto de canais de dimensões variadas por onde a água tem possibilidade de circular. Após o processo de mistura, as partículas sólidas dispersam-se de acordo com um conjunto de forças de fricção e gravitacionais, bem como através de forças de ligação entre estas. Porém, existe a possibilidade de ocorrência de fenómenos de instabilidade, como a segregação e a exsudação.

Entenda-se por fenómeno de exsudação, como a migração das partículas de água para a superfície da suspensão do *grout*, criando uma película de água superficial. Numa situação inicial deste fenómeno, as forças de ligação entre as partículas sólidas são ainda suficientemente fortes para manter a microestrutura do *grout* (Telha, 2015). Contudo, numa situação mais avançada onde exista uma exsudação excessiva, eventualmente devido à relação água/ligante utilizada e/ou à distribuição granulométrica do ligante, este fenómeno pode resultar numa suspensão de *grout* heterogénea, tornando-a incapaz de penetrar eficazmente no meio poroso e que exista uma boa aderência entre os materiais (Miltiadou-Fezans & Tassios, 2013). Quanto ao fenómeno de segregação, tal como o fenómeno de exsudação, a segregação está dependente da quantidade de água utilizada e está intrinsecamente ligada à forma, dimensão e densidade das partículas do *grout* (Laeffer et al., 1996). Este fenómeno consiste numa mais rápida disposição das partículas e/ou de aglomerados de partículas

de ligante, existindo uma tendência para estas se instalarem de uma forma estratificada na suspensão de *grout*. Neste caso, as forças existentes entre as partículas são incapazes de manter a microestrutura do *grout*, existindo uma variação da densidade da suspensão em função da altura, o que é prejudicial na injeção de *grouts* (Miltiadou-Fezans & Tassios, 2013).

A Figura 2.3 representa os dois fenómenos de instabilidade do *grout* referidos anteriormente.

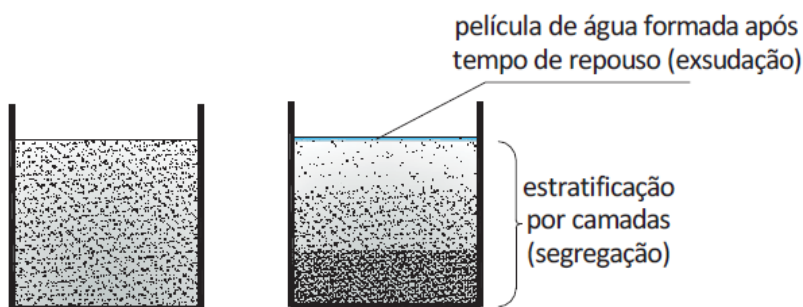


Figura 2.3 – Representação esquemática dos fenómenos de exsudação e segregação (Luso, 2012)

iii) Retenção de água

Pode-se definir capacidade de retenção como a capacidade de um *grout* em reter a água da mistura, aquando a sua injeção no interior de alvenarias secas e de absorção elevada. A capacidade do *grout* em reter a água na sua composição durante o maior tempo possível permite preservar um bom comportamento reológico e maior estabilidade com o intuito de assegurar uma injeção bem-sucedida (Assaad & Daou, 2014).

A perda de água da constituição do *grout* dentro da alvenaria pode originar mecanismos de bloqueio no processo de injeção, [(Brás & Henriques, 2012), (Van Rickstal, 2000)] devido ao aumento do atrito interno e colisão entre as partículas sólidas, levando a uma diminuição do grau de dispersão e, portanto, uma redução da capacidade de injeção (Assaad & Daou, 2014). De acordo com (Rosquoët et al., 2003) um elevado teor em água pode resolver os problemas de fluidez e de injectabilidade, contudo, esta propriedade origina também suspensões menos estáveis, apresentando deste modo, uma maior probabilidade de ocorrência de acontecimentos como exsudação e segregação (Biçer-Şimşir et al., 2009). Além disso, pode também levar a um aumento da porosidade total e consequentemente, a uma diminuição da resistência mecânica assim que o *grout* atinja o estado endurecido.

2.3. Superplastificantes

Os superplastificantes são adjuvantes frequentemente utilizados em betões, argamassas e *grouts*, com a finalidade de controlar e melhorar o comportamento reológico das misturas.

São adicionados durante a amassadura em quantidades muito pequenas e a sua presença na composição do *grout* concede uma variedade de benefícios relacionados com a trabalhabilidade.

Permitem uma melhor fluidez da calda para uma dada relação água/ligante possibilitando uma penetração mais eficiente em locais de difícil acesso que necessitem de bombagem (Matos, 2013). É ainda possível manter uma determinada consistência da calda reduzindo a quantidade de água utilizada [(Bjornstrom & Chandra, 2003), (Teixeira, 2013)] permitindo um aumento da resistência e durabilidade da mistura.

Do ponto vista químico, são agentes activos de superfície, ou seja, modificam as cargas superficiais das partículas do ligante fazendo com que as partículas se dispersem (Teixeira, 2013). Dito de outra forma, quando se mistura o ligante com a água, ocorre floculação das partículas do ligante devido à presença da água. Os superplastificantes permitem desencadear a desfloculação dos aglomerados das partículas de ligante (Figura 2.4). Ou seja, se as partículas tiverem maior atracção pelo líquido do que umas pelas outras, então terão tendência para se dispersar (Teixeira, 2013). Os mecanismos de acção que promovem a desfloculação do ligante são: repulsão electrostática e repulsão estérica (Guerreiro, 2014), contribuindo para uma mistura com maior fluidez, o que é altamente benéfico em termos de propriedades reológicas, como a viscosidade e a tensão de cedência.

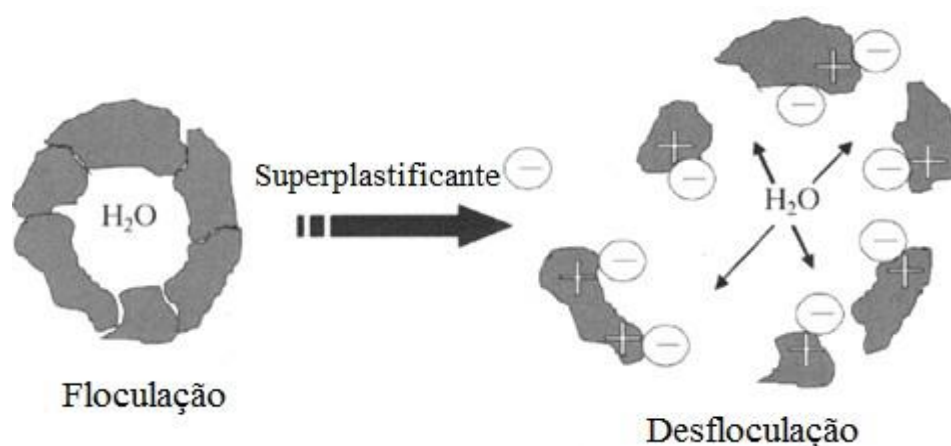


Figura 2.4 – Efeito do superplastificante na floculação das partículas de um *grout* (Adaptado de (Teixeira, 2013))

A tensão de cedência e, em menor extensão, a viscosidade plástica, diminuem com o aumento da concentração de superplastificante, sendo que acima de uma concentração crítica, em termos reológicos, o comportamento das pastas é essencialmente de um fluido newtoniano. Assim, com o uso da dosagem de superplastificantes adequada consegue-se tensões de cedência muito baixas devido à dispersão das partículas (Matos, 2013).

2.4. Influencia do meio poroso na penetrabilidade do *grout*

2.4.1. Capacidade de penetração

A penetrabilidade do *grout* está relacionada com o preenchimento dos vazios existentes no meio poroso. Para fazê-lo, o *grout* deve ser capaz de passar através da "mais estreita" largura possível de tais discontinuidades e superar as resistências ao fluxo, a fim de alcançar o máximo possível do volume interno dos vazios existentes. Segundo Jorne (F. Jorne et al., 2015b), nos meios porosos estudados existem dois tipos de vazios distintos passíveis de serem penetrados pela suspensão de *grout*: os vazios referentes ao interior das partículas constituintes do meio poroso e os vazios situados entre elas, sendo designados como os espaços intraparticular e interparticular, respectivamente. Os factores limitantes parecem ser a reologia (propriedades do fluxo) e tendência de filtração (efeito tampão) do *grout*. Ambos devem ser otimizados para atingir a penetração adequada.

A tendência de filtração é uma característica em que uma camada de partículas pode ser formada na abertura de um vazio ou numa constricção dentro do vazio / canal impedindo uma maior penetração do *grout* (Figura 2.5).

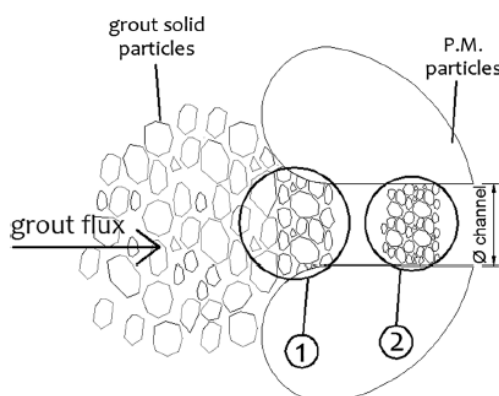


Figura 2.5 – Formação de aglomerado flocular: na entrada do vazio (1), no interior do vazio (2)
(adaptado de (F. Jorne et al., 2015b))

A tendência de filtração está relacionada com a dimensão das partículas sólidas do *grout*. Existem várias maneiras de descrever directa ou indirectamente, a distribuição das dimensões dessas partículas. Um método comum refere-se à utilização do parâmetro d_{95} , valor correspondente ao tamanho da malha do crivo através do qual passa 95% do material ligante.

O trajecto do fluxo de *grout* através do meio poroso pode ainda ser descrito por parâmetros como a porosidade, condutividade hidráulica ou abertura teórica. A vantagem ao usar este último é que pode ser facilmente comparada com a tamanho da partícula de *grout*, tornando assim mais fácil descrever a injectabilidade. Assim, numa situação de existência de poros de dimensão inferior à

granulometria das partículas de ligante, estas tornam-se incapazes de preencher completamente os vazios existentes.

A área a sombreado na Figura 2.6, representa a área disponível para uma suspensão (fluido Binghamiano), por outro lado, mais perto do ponto de contacto entre as partículas do meio poroso, apenas a componente líquida da suspensão de *grout*, isto é, a sua água constituinte (fluido newtoniano) irá ser capaz de penetrar.

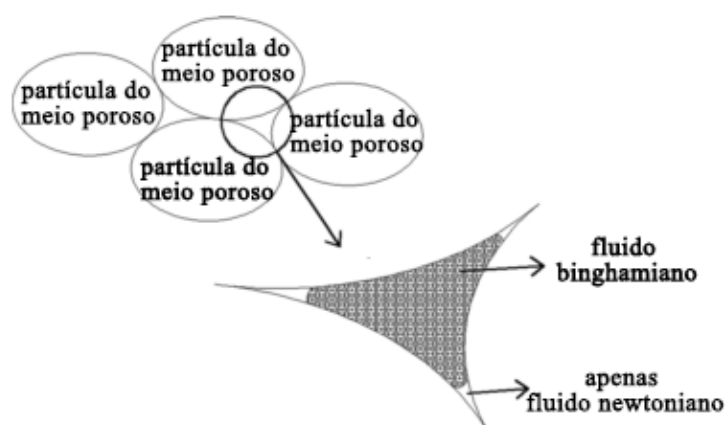


Figura 2.6 – Área disponível entre as partículas do meio poroso para um fluido newtoniano (água) e para um fluido binghamiano (*grout*) (F. Jorne et al., 2015b))

2.4.2. Avaliação da penetrabilidade do grout

Como já foi referido na literatura [(F. Jorne et al., 2015b), (Van Rickstal, 2000)], para uma suspensão granular (tais como *grouts* de cal hidráulica) ser capaz de penetrar um determinado meio poroso, a dimensão das partículas sólidas do *grout* devem ser compatíveis com as dimensões características do meio poroso (aberturas, vazios, interfaces, etc.).

Desse modo, as condições de penetração podem ser expressas em termos da relação (n) entre o tamanho das partículas sólidas de maior dimensão do *grout* (d) e um "representante" diâmetro de canais ou uma largura de canais a ser injectado (W_{nom}). Este rácio reflecte a necessidade prática das partículas sólidas de *grout* serem menores do que a abertura característica a ser penetrada. Caso se verifique, uma situação de existência de partículas de ligante com granulometria de dimensão superior aos poros no interior das partículas do meio poroso, estas tornam-se incapazes de preencher completamente os vazios existentes desse espaço, penetrando apenas a componente líquida da suspensão de *grout*, ou seja, a sua água constituinte. No entanto, segundo Jorne (F. Jorne et al., 2015b) o *grout* sendo um fluido binghamiano, apresenta ainda em certos casos dificuldade de penetrar também no espaço interparticular devido às características das partículas do meio poroso. Vários fenómenos estão por trás desta relação, tais como, a fricção causada devido à irregular forma das partículas sólidas, a ligação electrostática entre as partículas de ligante e o fenómeno de floculação,

devido a hidratação imediata das partículas de ligante de tamanho inferior (formação de pequenos aglomerados) são as principais causas para a tal dificuldade de penetração do *grout* nas zonas de vazios com menor dimensão perceptível na Figura 2.5 (F. Jorne et al., 2015b).

Nas últimas décadas diferentes autores têm estabelecido diferentes critérios, a fim de avaliar a penetração dos *grouts*. Mais recentemente, Miltiadou-Fezans e Tassios (Miltiadou-Fezans & Tassios, 2012) concluíram que quando W_{nom} não é conhecido, como no caso de meios granulares, é possível assumir a aproximação: $W_{nom} = 0,15 \times D_{15}$

Para caracterizar a dimensão e distribuição dos vazios dos diferentes meios porosos, devem ser considerados diversos parâmetros. Esses parâmetros são: o tamanho médio dos vazios (o que corresponde a d_{50} diâmetro – através do qual passa 50% da massa total), bem como os parâmetros $d(90)$, $d(15)$ e $d(10)$ (respectivamente ao tamanho da malha do peneiro através do qual passa 90%, 15% e 10% do meio poroso).

Os parâmetros acima mencionados são obtidos a partir das curvas granulométricas dos materiais apresentados no capítulo 3. O impacto desses parâmetros, no valor da injectabilidade, é analisado no capítulo 4.

2.4.3. Uso da lei de Darcy para modelar os ensaios de injeção

A alvenaria é simulada por uma rede de canais de fluxo tridimensionais, que representam os canais através dos quais, a injeção de *grout* penetra na alvenaria. Segundo anteriores investigações [(Gil, 1995), (Van Rickstal, 2000)] é possível simular o fluxo de *grout* através das amostras a fim de avaliar o comportamento das injeções no tempo, desenvolvendo um modelo teórico do fluxo do fluido, tendo em conta a lei de Darcy (Eq. 2.1).

$$V = k \times J \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Onde, k representa o valor da permeabilidade do meio poroso, J o gradiente hidráulico, V a velocidade do líquido através do meio poroso.

O ponto de partida para a criação deste modelo foi a teoria de fluxo laminar viscoso através de meios porosos. Um meio poroso é constituído por um conjunto de pequenas partículas em que os poros estão interligados entre si, formando canais de escoamento. A teoria de fluxo através de um meio poroso considera que o meio está saturado. Esta teoria é válida apenas para um meio incompressível, o que significa que não é possível a porosidade variar com a pressão à qual o líquido é submetido. A fim de modelar o comportamento das injeções no tempo, Collins (Collins, 1961) interpretou a lei de Darcy como uma resultante do equilíbrio de forças no fluxo constante de fluido,

com as constantes de densidade e viscosidade, dentro de uma amostra de material poroso, conforme apresentado na equação (Eq. 2.2).

$$\mathbf{B} \times \mathbf{q} \times \int \mu(\mathbf{z}) d\mathbf{z} + \mathbf{n} \times \mathbf{A} \times \int \rho(\mathbf{z}) d\mathbf{z} \times \mathbf{g} = \Delta \mathbf{p} \times \mathbf{n} \times \mathbf{A} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Portanto, a lei de Darcy pode ser reescrita considerando o equilíbrio destas três forças, conforme apresentado na equação (Eq. 2.3).

$$\mathbf{V} = \frac{q}{n \times A} = \frac{k}{\int \mu(\mathbf{z}) d\mathbf{z}} \times [\Delta \mathbf{p} - \int \rho(\mathbf{z}) \times \mathbf{g} d\mathbf{z}] \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Onde, k representa o valor da permeabilidade do meio poroso, $\int \mu(\mathbf{z}) d\mathbf{z}$ caracteriza a parcela referente à viscosidade do fluido, $\Delta \mathbf{p}$ diz respeito à pressão aplicada ao líquido e, por sua vez, $\int \rho(\mathbf{z}) \times \mathbf{g} d\mathbf{z}$, representa o peso próprio do fluido .

De referir, que quando o fluxo se dá através de um meio estratificado, é necessário o conhecimento de um coeficiente de permeabilidade designado por equivalente, K_v . Esse coeficiente de permeabilidade é calculado de acordo com (Eq. 2.4).

$$K_v = \frac{\sum h_i}{\sum \frac{h_i}{k_i}} \quad (\text{Eq.2.4})$$

Onde, K_v representa o coeficiente de permeabilidade equivalente vertical, $\sum h_i$ o somatório da altura de cada fracção e $\sum \frac{h_i}{k_i}$ o somatório da permeabilidade de cada fracção (parâmetro medido experimentalmente).

2.4.4. Teoria da frente de resistência

De acordo com a lei de Darcy, a resistência que o meio oferece ao fluxo é influenciada por a sua permeabilidade e a viscosidade do próprio fluido.

A teoria da frente de resistência baseia-se na hipótese de que, para além desta resistência que o meio oferece, existe uma resistência adicional por parte do fluxo do fluido. Ou seja, o fluido tem de romper os poros do meio filtrante, de modo a que as suas partículas sólidas possam penetrar. Uma vez que este tipo de tensão superficial é superado, é mais fácil para que o resto do fluido se escoe através do meio poroso [(Gil, 1995), (Van Rickstal, 2000)].

Em termos analíticos, a fim de aplicar esta teoria da frente de resistência, a lei de Darcy deve

ser reescrita, definindo a resistência total do meio (R_{total}). Segundo Van Rickstal, a resistência total do meio (R_{total}) pode ser determinada através da análise da quantidade de grout, injectada ao longo do tempo de injeção. Assim, sabendo o fluxo de *grout*, facilmente se obtém a resistência total através da equação (Eq. 2.5).

$$q = \rho_{grout} \times \frac{(\Delta P)}{R_{total}} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

Onde, q representa o fluxo de *grout* [Kg/s], ρ a massa volúmica do *grout* [Kg/m³], (R_{total}) a resistência total do meio [Pa.s/m³] e ΔP a diferença de pressão aplicada.

Fazendo uma analogia com um arranjo de resistências em série, como o fluido tem que passar por duas resistências, a resistência total pode assim ser expressa como a soma da resistência Darcy e a frente de resistência, conforme se pode verificar através da equação (Eq. 2.6):

$$R_{total} = \Sigma R_i = R_{Darcy} + R_{front} = \frac{\int \mu(z).dz}{k_{meio}.A} + \frac{F.\mu_{front}}{k_{front}.A} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

A equação (Eq. 2.6) pode ser simplificada considerando, $k_{front} = k_{meio}$

A partir da equação (Eq. 2.6), o valor da frente de resistência (R_{front}) pode então ser determinado para cada amostra injectada, assim como o parâmetro F , parâmetro da frente de resistência, através da equação (Eq. 2.7):

$$R_{front} = \frac{F.\mu_{front}}{k_{front}.A} \quad (\text{Eq. 2.7})$$

Onde, (R_{total}) representa a resistência total do meio [Pa.s/m³], μ a viscosidade dinâmica do *grout* [Pa.s], K a permeabilidade [m²], A a área da base do tubo [m²] e (F) o parâmetro de frente de resistência [m].

3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

A caracterização dos materiais e equipamentos utilizados, assim como a metodologia experimental adoptada durante este estudo é definida e analisada no presente capítulo. São ainda abordados os ensaios efectuados relacionados com o comportamento do *grout* em conjunto com o meio poroso, durante e após o momento da injeção. A metodologia experimental utilizada teve como objectivo garantir o máximo de rigor na obtenção dos resultados que posteriormente irão ser analisados nos capítulos seguintes.

Toda a campanha experimental foi realizada nas instalações do Departamento de Engenharia Civil (DEC) na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

3.1. Estudo do *grout*

De seguida, procede-se à caracterização dos materiais estudados quer na composição do *grout*, quer na granulometria do meio poroso.

3.1.1. Composição do *grout*

Como já foi mencionado anteriormente, um *grout* tem como constituintes um ligante, água e adjuvantes. O ligante utilizado na formulação de ambas as misturas foi a cal hidráulica HL5 produzida pela SECIL-Martingança, cujas propriedades físicas e químicas são apresentadas no Quadro 3.1, Quadro 3.2 e Quadro 3.3.

A escolha por este ligante deveu-se ao facto de este apresentar maior compatibilidade mecânica, física e química com os materiais originais das alvenarias históricas comparativamente ao cimento (Jorne et al., 2012a).

Quadro 3.1 – Características da cal hidráulica HL5

Resistência mecânica à compressão	7 dias $\geq 2,0$ MPa 28 dias > 5.0 e < 15.0 MPa	
Finura	$90\ \mu\text{m} \leq 15,0\ \%$ $200\ \mu\text{m} < 2.0\ \%$	
Tempo de presa	Inicial: $> 1\text{h}$ Final: $\leq 15\text{h}$	
Expansibilidade	$\leq 2,0\ \text{mm}$	
Cal livre	3,89 %	
Perda ao rubro	19,84 %	

^a Como indicado na ficha técnica do fornecedor

Quadro 3.2 – Densidade e finura da cal HL5 usando o permeâmetro Blaine (F. Jorne et al., 2015b)

Amostra	HL5
Densidade [g/cm ³]	2,7
Finura Blaine [cm ² /g]	9400

Quadro 3.3 – Caracterização química da cal HL5 de acordo com os resultados XRF(F. Jorne et al., 2015b)

Nome do composto	HL5 (%)
MgO	0,99
Al ₂ O ₃	2,96
SiO ₂	10,86
SO ₃	1,97
K ₂ O	0,89
CaO	78,97
TiO ₂	0,30
MnO	0,04
Fe ₂ O ₃	2,96
SrO	0,06
Na ₂ O	0,26

A distribuição da granulometria da cal HL5 utilizada no procedimento experimental para caracterização do *grout* é representada na Figura 3.1.

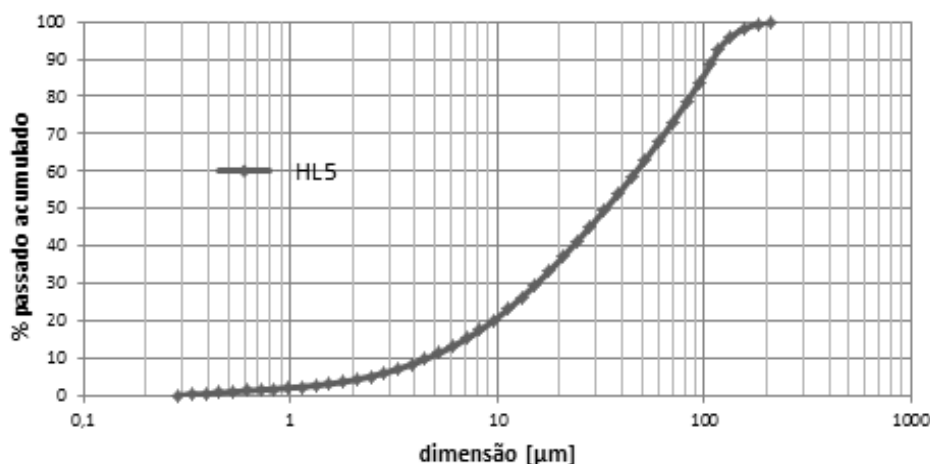


Figura 3.1 – Distribuição da granulometria da cal HL5 (F. Jorne et al., 2015b)

Como adjuvante, foi utilizado um superplastificante com base em policarboxilato (Glenium Sky 617) produzido pela BASF, cujas características estão apresentadas no Quadro 3.4. Este superplastificante pertence à terceira geração cuja repulsão é uma combinação de efeitos estéricos e electrostáticos acoplados, também conhecida como repulsão electroestérica [(Roussel et al., 2010), (Vikan, 2005)]. Assim, são melhoradas as propriedades reológicas do *grout*, diminuindo a viscosidade plástica e a tensão de cedência (Baltazar et al., 2012b).

Quadro 3.4 – Características do superplastificante

Nome comercial	Glenium Sky 617 (BASF)
Função	Reduzir a doagem de água do <i>grout</i> ; Promover a fluidez do <i>grout</i> ; Evitar a floculação do <i>grout</i> .
Estrutura do material	Policarboxilato
Cor	Castanho
Densidade (g/cm³)	1,05
pH	8
Carga	Aniónica
Teor de iões Cloreto (%)	< 0,10

^a Como indicado na ficha técnica do fornecedor

A composição do *grout* utilizado nas injeções dos provetes encontra-se apresentada no Quadro 3.5.

A relação água/ligante utilizada foi de 0,5 que, de acordo com outros estudos já realizados [(Jorne et al., 2012a), (Baltazar & Henriques, 2014)], corresponde ao valor que apresenta um melhor comportamento a nível de injeção.

Quadro 3.5 – Composição do *grout* de injeção

Designação	% de HL5	% de superplastificante	Relação Água/Ligante
<i>Grout 1,2%SP</i>	100	1,2	0,5

3.1.2. Procedimento de mistura

O procedimento de mistura adoptado foi semelhante a outros trabalhos já realizados [(Baltazar et al., 2012a), (Jorne et al., 2012a)]: uma quantidade total de ligante é adicionada a 70% do total de água da mistura e são misturadas durante aproximadamente 10 minutos. De seguida, é adicionado o superplastificante já diluído na restante água. Autores como [(Aiad, 2003), (Bjornstrom & Chandra, 2003), (Baltazar et al., 2012b)], o atraso de 10 minutos sobre a adição de superplastificante melhora a eficácia de dispersão das partículas. Na realidade, em fases iniciais de hidratação, uma grande quantidade de fase anidro (“*anhydrous phase*”, em inglês) é gerada muito rapidamente e se o superplastificante estiver presente, alguma parte deste fica parcialmente intercalada (co-precipitação) entre camadas de hidratos, ficando impedindo de exercer a acção dispersante das partículas de ligante [(Flatt & Houst, 2001), (Hanehara & Yamada, 2008)].

Após todos os materiais terem sido adicionados, a mistura foi mantida durante mais três minutos a 2400 rpm. O balde onde foi efectuada a mistura tinha uma capacidade de 5 L, com 177 mm de diâmetro e uma altura de 244 mm. A lâmina utilizada para o procedimento de mistura tinha uma forma helicoidal. Foi dada especial atenção ao procedimento de mistura, de modo a evitar a presença

de grânulos que possam causar alterações dos resultados experimentais (Guerreiro, 2014). De referir ainda que o laboratório onde foi realizado os ensaios tinha uma temperatura ambiente de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e a uma humidade relativa de $60\pm 5\%$. A água utilizada na mistura água estava a uma temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$.

3.2. Estudo do meio poroso

3.2.1. Materiais estudados

O meio poroso escolhido para a realização deste estudo foi a areia. Foram utilizadas areias da AREIPOR com diferentes granulometrias, divididas em quatro tipos, como ilustra o Quadro 3.6 e a Figura 3.2. De salientar que as areias foram previamente lavadas e secas em estufa antes da sua utilização nos ensaios.

Quadro 3.6 – Dimensão das partículas de areia

Grosso (G) [4,75mm - 9,5mm]	Médio (M) [2,0mm - 4,75mm]	Fino (F) [1,18mm - 2,36mm]	Mais fino (f) [0,5mm - 1,18mm]
APAH 4	APAH 6	APAH 12	APAH 20



Figura 3.2 – Areia: Quatro dimensões diferentes (grosso, médio, fino e mais fino)

De forma a simular as condições existentes no interior de uma alvenaria, foram criados modelos representativos seguindo os pressupostos de Gil e Van Rickstal [(Gil, 1995), (Van Rickstal, 2000)].

A disposição dos diferentes meios porosos nas amostras é mais complexa, várias fracções de diferentes granulometrias e diferentes permeabilidades são combinadas paralelamente em três camadas de igual altura (Base, Meio e Topo). No total foram analisadas onze amostras com diferentes meios porosos, combinando as quatro granulometrias de areia (Grosso, Médio, Fino e fino), de diferentes formas.

No Quadro 3.7, os diferentes tipos de meios porosos encontram-se diferenciados de acordo com cada designação e correspondentes tamanhos das partículas.

Quadro 3.7 – Composição dos diferentes meios porosos

Designação	Grosso (G) [9,5mm - 4,75mm]	Médio (M) [4,75mm - 2,0mm]	Fino (F) [2,36mm - 1,18mm]	Mais fino (f) [2,0mm - 0,5mm]
(G,G,G)	3/3	-	-	-
(G,M,G)	2/3	1/3	-	-
(G,F,G)	2/3	-	1/3	-
(G,M+F,G)	2/3	1/6	1/6	-
(G,M+f,G)	2/3	1/6	-	1/6
(G,G.M,G)	5/6	1/6	-	-
(G,G.F,G)	5/6	-	1/6	-
(G,G.f,G)	5/6	-	-	1/6
(G,M.F,G)	2/3	1/6	1/6	-
(G,M.f,G)	2/3	1/6	-	1/6
(F,G,F)	1/3	-	2/3	-

Em seguida são apresentadas as curvas granulométricas dos diferentes meios porosos em estudo, na Figura 3.3.

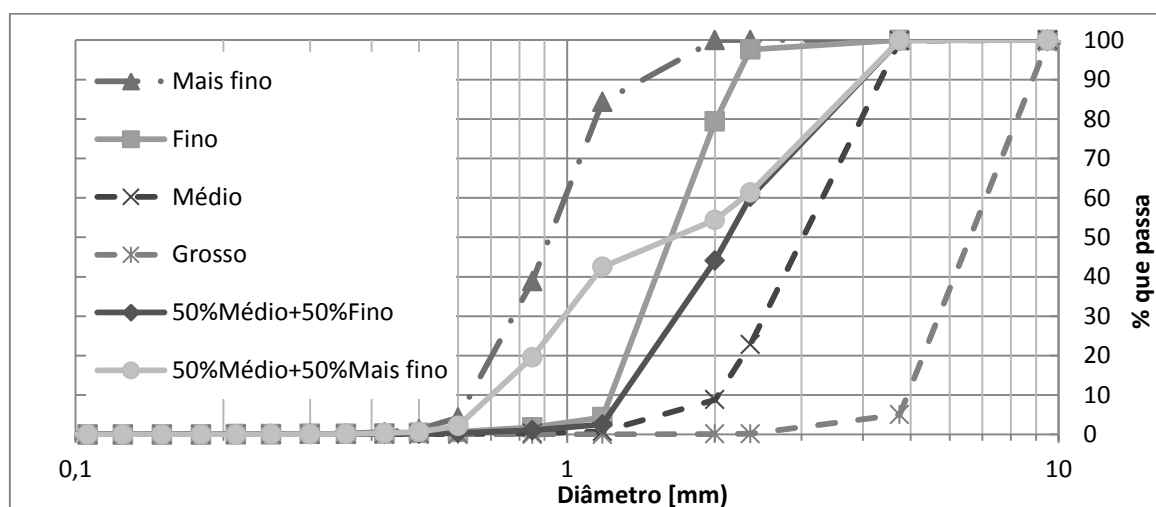


Figura 3.3 – Areia: Curva granulométrica do meio poroso (adaptado de (Guerreiro, 2014))

É importante referir que, a porosidade de cada material foi obtida através do volume de água preenchido dentro do cilindro, não traduzindo o valor real da porosidade que o *grout* consegue penetrar dentro do meio poroso, sendo este último naturalmente bastante inferior. Outros parâmetros que ajudam na caracterização do meio poroso são o diâmetro da partícula através do qual passa 10%, 50% e 90% do material, ou seja os parâmetros d10, d50 e d90 e ainda o parâmetro Wnom que representa o diâmetro de canais ou largura de canais a ser injectado, apresentados no Quadro 3.8.

Quadro 3.8 – Características dos meios porosos

	Designação					
	Grosso (G)	Médio (M)	Fino (F)	Mais fino (f)	50%Médio+50%Fino (M+F)	50%Médio+50%Mais fino (M+f)
Porosidade	61,2	59,3	50,6	41,4	55,1	46,5
d₁₀ [mm]	5,00	2,03	1,24	0,64	1,33	0,71
d₅₀ [mm]	7,01	3,20	1,68	0,93	2,13	1,70
d₉₀ [mm]	9,02	4,44	2,21	1,48	4,15	4,13
Wnom	0,79	0,32	0,19	0,10	0,21	0,12

Ao conceber um modelo para descrever o processo de injeção, a permeabilidade é um dos principais parâmetros a ter em conta para a caracterização do meio poroso, uma vez que tem uma grande influência na penetração, evolução e distribuição do *grout* no interior da alvenaria. A configuração do teste para a medição da permeabilidade das amostras encontra-se representado na Figura 3.4, onde é registado o tempo necessário para que um certo volume de água atravesse o meio poroso a uma dada pressão aplicada.

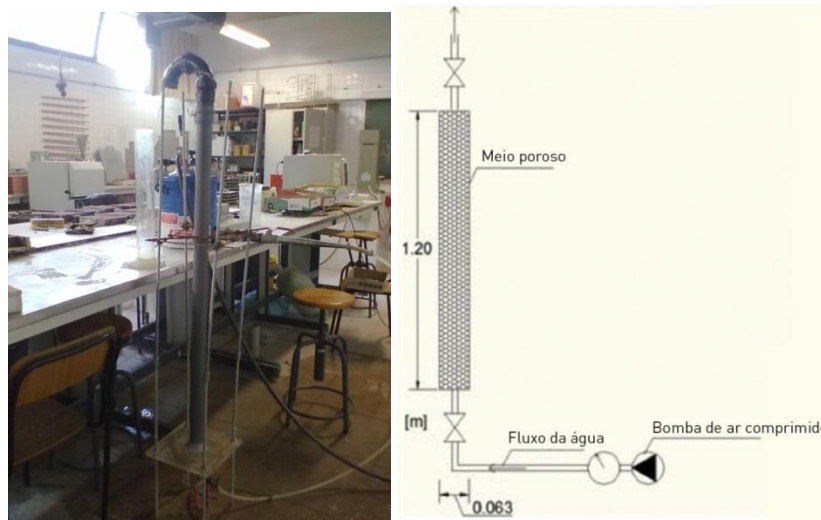


Figura 3.4 – Ensaio de permeabilidade. Esq.: Modelo real utilizado; Dir.: Dispositivo adoptado para medição da permeabilidade do meio poroso (adaptado de (F. Jorne et al., 2014a))

A permeabilidade dos meios porosos foi obtida com base na Lei de Darcy (Eq. 3.6), para fluxos laminares através da seguinte forma:

$$q = \frac{K \times A}{\mu \times L} \times \Delta P \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Onde, q representa o fluxo de água [m³/s], K a permeabilidade [m²], A a área do tubo [m²], μ a viscosidade dinâmica da água [Pa.s], L o comprimento do tubo [m] e ΔP a diferença de pressão aplicada [bar].

Os valores correspondentes à permeabilidade de cada meio poroso, obtidos através da equação (Eq. 5.4), são apresentados no Quadro 3.9.

Quadro 3.9 – Permeabilidade (k) dos diferentes meios porosos

K [m ²]										
G	M	F	f	M+F	M+f	G.M	G.F	G.f	M.F	M.f
8,6E-10	6,6E-10	4,9E-10	2,7E-10	5,5E-10	2,9E-10	8,1E-10	6,5E-10	3,3E-10	6,1E-10	3,0E-10

A relação entre a pressão e o fluxo de água que atravessa o meio poroso constituído pelas diferentes distribuições granulométricas pode ser observada nas Figuras 3.5 e 3.6.

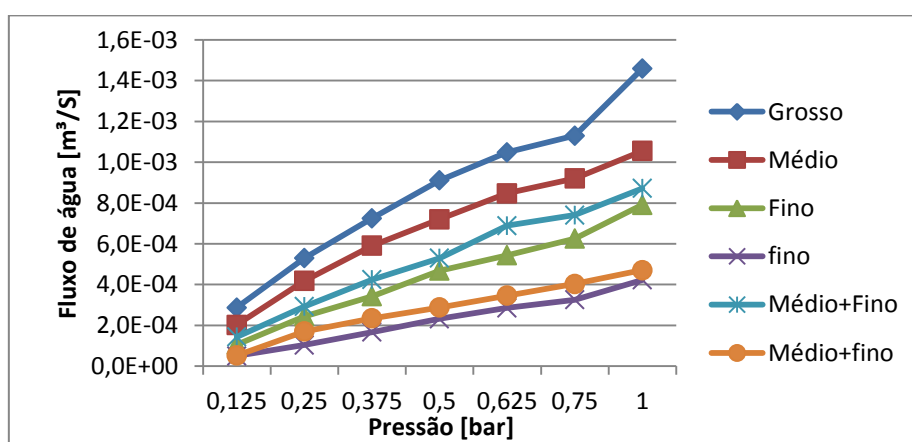


Figura 3.5 – Fluxo de água [m³/s] vs Pressão [bar] nas amostras com fracção intermédia dividida horizontalmente

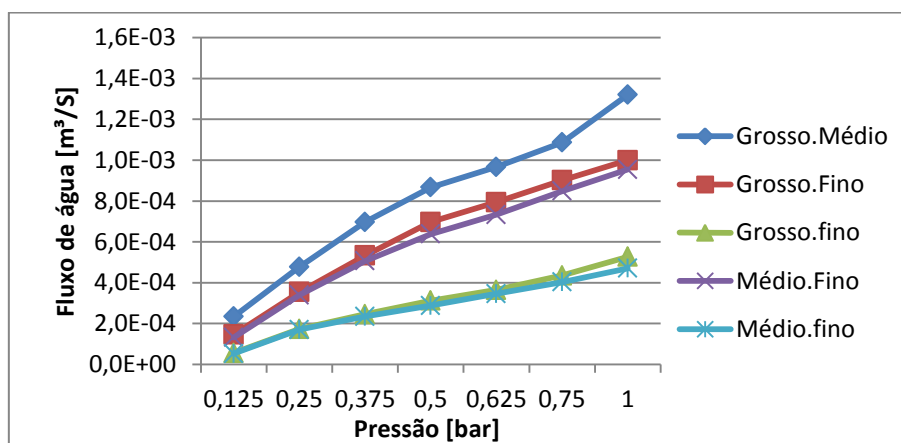


Figura 3.6 – Fluxo de água [m³/s] vs Pressão [bar] nas amostras com fracção intermédia dividida verticalmente

Analisando os resultados apresentados na Figura 3.5, é possível observar uma diminuição dos valores de fluxo de água com a diminuição da granulometria do meio, com o meio poroso fino a apresentar valores relativamente baixos independentemente da pressão aplicada. Quanto aos meios mais grosseiros (Grosso e Médio), verifica-se um aumento do fluxo de água com o aumento da pressão aplicada, embora esse aumento seja mais significativo para pressões inferiores. Nos meios

porosos de granulometria mais fina ao ser aplicada uma menor pressão a água leva mais tempo a penetrar o interior dos poros, resultando num fluxo de água inferior. Por outro lado, nos meios porosos de granulometria superior, a água consegue facilmente penetrar na maioria dos poros, mesmo a baixa pressão, resultando num aumento rápido de fluxo de água.

Comparando os valores obtidos para os meios porosos constituintes por duas fracções de diferentes granulometrias dispostas paralelamente à direcção do escoamento, representados na Figura 3.6, verifica-se novamente que a permeabilidade dos meios que contêm uma fracção de granulometria mais fina é inferior. Portanto, pode-se supor que a permeabilidade de um meio poroso depende principalmente da quantidade de partículas finas presente na sua constituição.

3.2.2. Ensaios realizados no estado fresco

3.2.2.1. Ensaio de injeção

As injeções de *grout* foram realizadas segundo o método que se encontra representado na Figura 3.7 (esquema) e Figura 3.8 (imagem real), desenvolvido por Jorne (F. Jorne et al., 2015b), este método consiste na introdução de uma camada descontínua de material calcário grosseiro com 3 cm de altura na base do cilindro junto ao local de entrada da injeção, de modo a impedir o adensamento de partículas do meio poroso nessa zona, evitando, assim, possíveis problemas de perturbação ou bloqueio à passagem do *grout* por parte do meio poroso no início da injeção.

De referir ainda, que este trabalho foi realizado no seguimento das injeções realizadas para a tese de doutoramento do Mestre Fernando Jorne, nas quais foram utilizados modelos representativos tentando simular quanto possível o núcleo interno de alvenarias antigas.

A criação dos modelos envolveu o uso de cilindros de acrílico, dispondo diferentes granulometrias do meio poroso em estudo de várias formas, seguindo os pressupostos de [(Gil, 1995), (Van Rickstal, 2000)] tendo como base um sistema dispositivo utilizado em trabalhos anteriores [(Binda et al., 2003), (Brás & Henriques, 2012)].

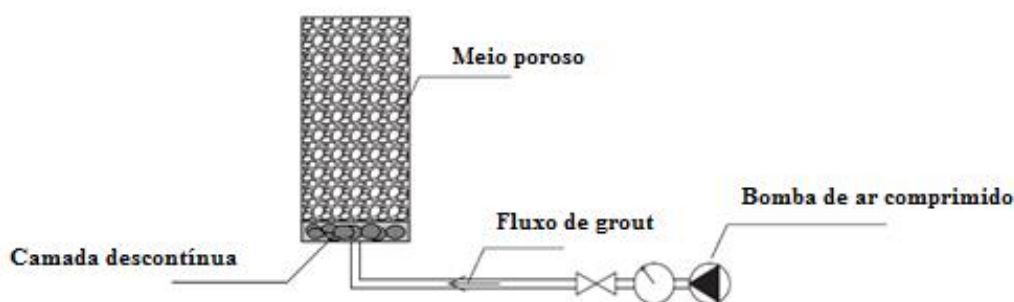


Figura 3.7 – Esquema representativo do método de injeção (adaptado de (Coelho, 2013))



Figura 3.8 – Modelo real do método de injeção (Telha, 2015)

A injeção foi efectuada tridireccionalmente da base para o topo, com uma pressão de 0,5bar constante durante o processo.

De acordo com (Binda et al., 2003), a injeção de *grout* realizada com recurso ao modelo apresentado pode proporcionar melhores condições de injeção relativamente a uma situação de uma alvenaria real, visto que no modelo existem mais vazios ligados entre si do que são expectáveis num caso real, especialmente no interior dos panos de alvenaria.

3.2.3. Ensaio realizados no estado endurecido

3.2.3.1. Ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons

O ultra-som é uma onda mecânica longitudinal com frequência acima de 20KHz, não detectável pelo ouvido-humano (Coelho, 2013). Este tipo de ondas caracteriza-se pela oscilação das partículas na direcção de propagação da onda, podendo ser transmitidas a materiais nos estados sólido, líquido ou gasoso. O ensaio por ultra-som é uma técnica não-intrusiva e é realizado com o uso de ondas mecânicas ou acústicas colocadas no meio em inspecção (Guerreiro, 2014), tem como objectivo a detecção de descontinuidades internas, presentes nos mais diversos tipos de materiais. Trata-se de um ensaio bastante expedito e eficiente pois permite avaliar com o menor grau de incerteza possível o estado do interior de um material ou elemento construtivo [(Binda et al., 2007), (Binda & Saisi, 2009), (Jorne et al., 2012b)].

Esta técnica baseia-se no princípio de propagação de ondas elásticas, o qual define a velocidade de propagação das ondas depende das propriedades elásticas do meio. A velocidade é tanto maior quanto maior for a massa volúmica do material, uma vez que a onda se propaga por vibração das partículas sólidas que o constituem. Assim, as variações significativas da velocidade de transmissão denunciam alterações relevantes nas características dos materiais onde a onda se propaga

[(Anzani et al., 2006), (Binda et al., 2007), (Concu et al., 2010a)].

O ensaio de ultra-sons foi realizado de acordo com a norma ASTM C597-02 (American Society for Testing and Materials, 2004), segundo o método por transmissão directa (*through-transmission*), como ilustrado na Figura 3.9. Este método consiste na colocação de um transdutor emissor de um dos lados do corpo a ensaiar e de um transdutor receptor na face oposta. De modo, a garantir uma medição eficaz evitando bolsas de ar foi colocado um agente de ligação, um gel para ultra-sons, entre os transdutores e as amostras. O equipamento utilizado é do tipo PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester*) LAB da PROCEQ, que emite um impulso eléctrico de frequência ultra-sónica. Utilizou-se um transdutor cónico de 54kHz, e segundo estudos efectuados anteriormente por Coelho (Coelho, 2013), de forma a garantir condições que permitem melhores resultados, optou-se por um valor de sinal emitido de 500V e um ganho máximo permitido pelo equipamento (100x) (Guerreiro, 2014).

De notar que o meio da amostra se deve apresentar completamente seco, um meio poroso húmido, pode causar um aumento da velocidade de propagação de ultra-sons. Deste modo antes da realização dos ensaios ultra-sónicos, as amostras permaneceram numa estufa, durante 24 horas a uma temperatura de $60\pm5^{\circ}\text{C}$, sendo posteriormente arrefecidas até à temperatura ambiente.



Figura 3.9 – Medição efectuada num provete inteiro (esq.) e numa fatia (dir.) através do método por transmissão directa

Registados os tempos (T em segundos) que o impulso emitido levou a percorrer as distâncias (L em metros) desde o transmissor até ao receptor, foram posteriormente obtidas a velocidade de ultra-sons do seguinte modo:

$$V = \frac{L}{T} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

O procedimento adoptado para a avaliação de cada um dos provetes injectados teve como base a realização de dois tipos de ensaios distintos. O ensaio de ultra-sons do provete inteiro e das fatias após o corte do mesmo. O ensaio de ultra-sons no provete inteiro tem como objectivo analisar a

amostra como um todo, tendo sido utilizada uma metodologia desenvolvida por Jorne (Jorne et al., 2012b), em que a malha, como a ilustrada na Figura 3.10, apresenta na sua constituição seis pontos distando 4 cm entre si, com o ponto inferior a 6 cm da base (devido à presença da camada descontínua de 2 cm), ao longo de quatro linhas longitudinais às amostras perpendiculares com os topos. Os resultados obtidos serão usados posteriormente para elaboração dos tomogramas ultra-sónicos, apresentados no capítulo 4.

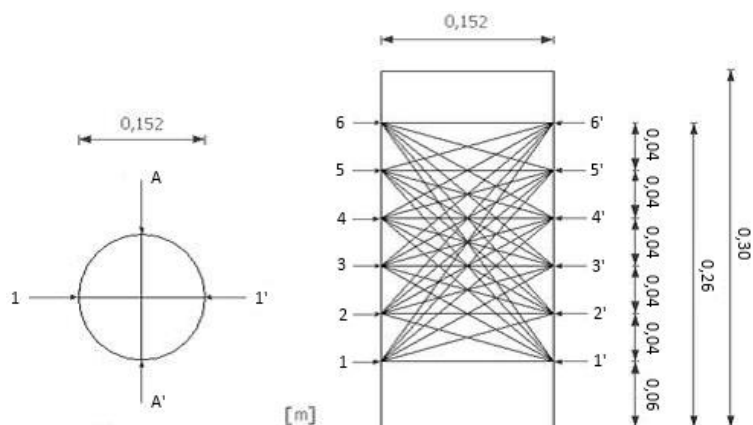


Figura 3.10 – Esquema da malha de ensaio de ultra-sons de provete inteiro: vista de topo (esq.) e corte 1-1' (dir.) (Guerreiro, 2014)

Numa fase seguinte, os provetes foram sujeitos a cortes transversais a 2 cm, 10 cm, 18 cm e 26 cm da face inferior da base, de acordo com o esquema representado na Figura 3.11. Destes cortes resultaram três fatias correspondentes à base (fatia localizada entre os 2 e os 10 cm de altura do provete), meio (fatia localizada entre os 10 e os 18 cm de altura do provete) e topo (fatia localizada entre os 18 e os 26 cm de altura do provete) de cada amostra, de salientar ainda que a camada descontínua bem como a zona superior foram desprezadas.

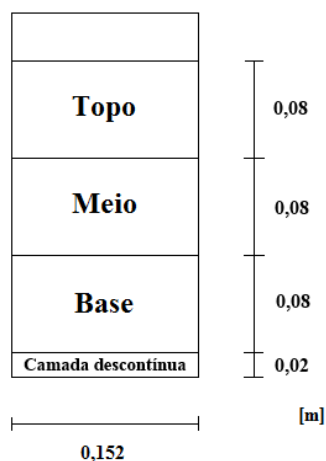


Figura 3.11 – Esquema representativo da localização dos cortes efectuados nos provetes (Guerreiro, 2014)

O corte foi realizado húmido nas zonas pretendidas com recurso a uma máquina de corte JUMBO, conforme ilustrado na Figura 3.12.



Figura 3.12 – Corte do provete

As três fatias de cada amostra resultantes do corte dos provetes foram posteriormente analisadas recorrendo ao ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons. A sua realização foi efectuada segundo o mesmo método (método por transmissão directa) e nas mesmas condições que os provetes. Contudo, o objectivo neste caso era compreender a eficácia da injeccção em função da altura, analisando as diferenças em altura do meio poroso injectado. Neste caso, utilizou-se uma malha semelhante à utilizada por diversos autores [(Jorne et al., 2012b), (Coelho, 2013), (Guerreiro, 2014), (Telha, 2015)] para medição das velocidades de propagação de ultra-sons. Esta malha, foi disposta em forma de pentágono, localizada a meia altura da cada fatia, tal como se encontra esquematizado na Figura 3.13. Ainda na mesma figura, as distâncias a azul têm um comprimento de 14,5 cm, enquanto as distâncias a vermelho têm um comprimento de 8,9 cm.

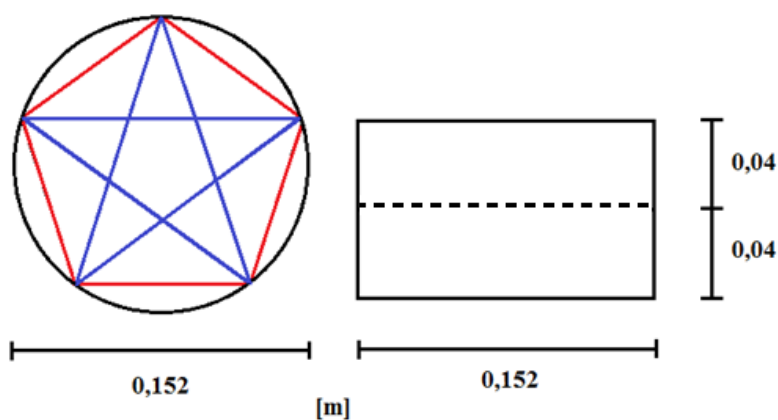


Figura 3.13 – Esquema da malha de ensaio de ultra-sons de em cada fatia inteiro: vista de topo (esq.) e vista lateral (dir.) (Guerreiro, 2014)

3.2.3.2. Ensaio de resistência à tracção por compressão diametral

A realização do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral (*Splitting Tensile Strength Test*), seguiu-se após a realização dos ensaios ultra-sónicos em cada uma das fatias. Para a realização deste ensaio é necessário o conhecimento do diâmetro e espessura médios das amostras. Estes valores resultaram da média de quatro medições, quer do diâmetro (em quatro direcções distintas), quer da espessura das fatias (em quatro pontos distintos).

As medições em todas as fatias foram realizadas com recurso a uma craveira, tal como ilustrado na Figura 3.14.



Figura 3.14 – Medição das dimensões da fatia: diâmetro (esq.) e espessura (dir.)

O ensaio foi elaborado de acordo com a norma C 496/C 496M-04 (American Society for Testing and Materials, 2004). Este ensaio consiste na compressão do provete (fatia) através da aplicação da força em duas geratrizes diametralmente opostas que, consequentemente, provoca o aparecimento de tracções na direcção perpendicular à força aplicada, originando a rotura do provete, tal como ilustrado na Figura 3.15.

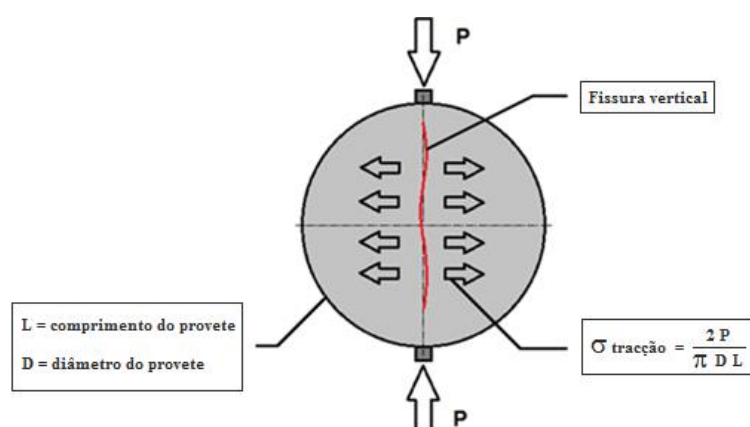


Figura 3.15 – Mecanismo de rotura de um provete submetido ao ensaio de resistência à tracção por compressão diametral (Coelho, 2013)

Através da Figura 3.16 é representado um exemplo real do mecanismo de rotura descrito anteriormente.



Figura 3.16 – Aspecto de uma fatia após um ensaio de resistência à tracção por compressão diametral



Figura 3.17 – Sistema de ensaio de resistência à tracção por compressão diametral

Conhecido o valor da força de rotura P obtido após a realização do ensaio, calcula-se a resistência à tracção por compressão diametral σ segundo a fórmula:

$$\sigma = \frac{2 P}{\pi D L} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Em que, σ representa a resistência à tracção [MPa], P a força de rotura [N], D o Diâmetro do provete [mm] e L o comprimento do provete [mm].

3.2.3.3. Tomografia ultra-sónica

A tomografia ultra-sónica é entre as técnicas de análise não-destrutivas, uma das mais eficientes e adequada na avaliação das características morfológicas internas de elementos estruturais [(Cantini et al., 2012), (Binda et al., 2003b), (F. Jorne et al., 2014)]. É uma técnica computacional que se baseia num método iterativo que processa uma grande quantidade de dados recolhidos na superfície externa para reproduzir a estrutura interna de um objecto (Binda et al., 2003b). Velocidades ultra-sónicas são utilizadas para entrada num programa de computador que desenvolve um modelo tridimensional de distribuição dessas velocidades (Schullerl et al., 1997). São então, obtidos “mapas” normalmente designados por tomogramas que podem ser apresentados em duas ou três dimensões. Através destes, é possível perceber-se a localização das zonas mais compactas (associadas às maiores velocidades ultra-sónicas) e menos compactas (associadas às menores velocidades ultra-sónicas) do corpo em estudo [(Binda et al., 2003b), (Coelho, 2013)].

No estudo em questão, para a obtenção dos tomogramas, utilizou-se os resultados provenientes das medições efectuadas ao nível da superfície do provete, usada no ensaio ultra-sónico do provete inteiro (vd. Figura 3.10). Para tal, recorreu-se ao programa GEOTOMCG, para o processamento das velocidades ultra-sónicas efectuadas nos provetes, utilizado anteriormente por Guerreiro [(Guerreiro, 2014) e (Telha, 2015)]. Este programa pressupõe o funcionamento com os sistemas operativos actuais e fornecimento de tomogramas em 2D e 3D. Porém, embora, este exiba com qualidade tomogramas 3D, no que diz respeito aos planos 2D as imagens fornecidas não reflectem o mesmo grau clareza, apresentando ao invés uma forma demasiado geométrica, não demonstrando convenientemente o interior do provete. Assim, de maneira a conseguir ultrapassar a referida limitação e com a finalidade de melhorar a qualidade de tomogramas 2D recorreu-se a um programa gráfico, denominado por SURFER, possibilitando alcançar imagens com melhor qualidade do estado interior do provete, (Guerreiro, 2014). Em seguida, na Figura 3.18, apresentam-se diferenciados os dois tipos de imagens obtidos dos programas anteriormente mencionados, referentes à mesma amostra.

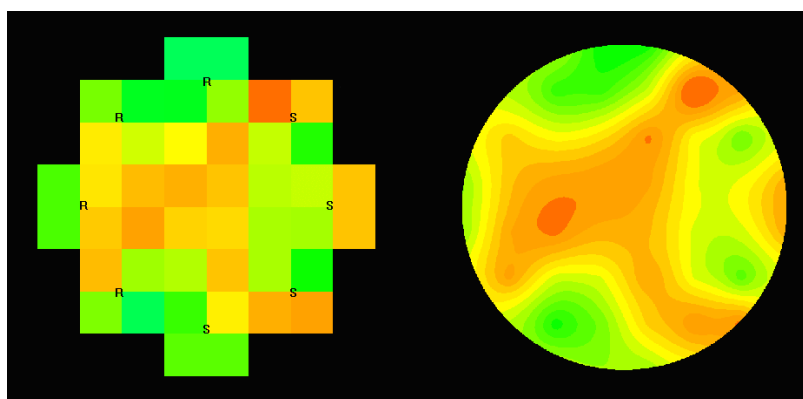


Figura 3.18 – Exemplo de tomograma ultra-sónico de um provete obtido com o GEOTOM (esq.) e tomograma do mesmo provete melhorado com o SURFER (dir.)

Tal como supramencionado, realizou-se o processo de obtenção de tomogramas ultra-sónicos com base num método iterativo, designado de SIRT (*Simultaneous Iterative Reconstruction Technique*), em que se definiram 15 iterações no total. Trata-se de um método no qual é realizada uma inversão de dados, originando um campo de velocidades na secção transversal da amostra. No que concerne aos cálculos realizados com o referido método, estes baseiam-se numa grelha rectilínea tridimensional de pontos, com *voxels* ou elementos de volume de intervenção. Assim, os valores de velocidade são discriminados nos pontos, sendo, deste modo, calculados dentro de *voxels* por interpolação linear múltipla (Guerreiro, 2014). Ademais, num material elástico imperfeito, uma queda exponencial da amplitude da onda com a distância desde o ponto de origem é provocada por uma atenuação intrínseca, visto as ondas perderem energia como consequência do atrito interno, cujo é tanto maior conforme a magnitude das perdas das propriedades físicas do meio (Buyukozturk, 1998). Deste modo, torna-se fulcral concluir, que embora a apertada grelha de medições usada inclua medições e tempos computacionais longos, possibilitou a obtenção de uma resolução do provete com maior nitidez, pela sua definição da forma dos vazios ser mais precisa. Esta conclusão é congruente com os resultados alcançados por Concu et al. [(Concu et al., 2010b), (Concu et al., 2010a)] e Cantini et al. (Cantini et al., 2012), sendo que este último compreendeu o efeito da densidade do mapa de *ray path* – cujo depende directamente da grelha escolhida –, dando relevância para o benefício de alguma redundância para uma melhorada resolução de tomogramas e, consequentemente, uma melhor identificação de diferenças locais.

4. INFLUÊNCIA DO MEIO POROSO NA INJEÇÃO

4.1. Introdução

O presente capítulo tem como objectivo a análise da injectabilidade do *grout* variando o meio poroso ao longo do escoamento. Para tal, foram realizados à semelhança de anteriores investigações [(Brás & Henriques, 2012), (Gil, 1995), (Kalagri et al., 2010), (Van Rickstal, 2000)], testes de injectabilidade recorrendo a modelos simplificados, de forma a simular, com a maior fiabilidade possível, meios porosos encontrados no pano interior de alvenarias antigas degradadas. Assim como visualizar os fenómenos físicos ocorrentes no meio poroso durante a injeção.

A criação dos modelos envolveu o uso de cilindros de acrílico com dez centímetros de diâmetro interno e quarenta e cinco de altura, estes foram preenchidos seguindo os pressupostos de Van Rickstal e Gil [(Van Rickstal, 2000), (Gil, 1995)], dispondo de várias formas as diferentes granulometrias do meio poroso, conforme apresentado na Figura 4.1.

Numa primeira fase, os cilindros são preenchidos com apenas uma fracção completamente homogénea ao longo de todo o cilindro (Tipo 1), de referir que esta disposição apenas foi usada para a análise do meio poroso de maior granulometria. Numa fase posterior, a disposição das amostras é mais complexa, várias fracções de diferentes granulometrias são combinadas paralelamente em três camadas distintas de igual altura, sendo a granulometria da camada intermédia diferente das restantes (Tipo 2). Um último caso é analisado em que o cilindro tem igualmente três camadas, mas onde a camada intermédia é dividida verticalmente com duas fracções de diferentes granulometrias (Tipo 3).

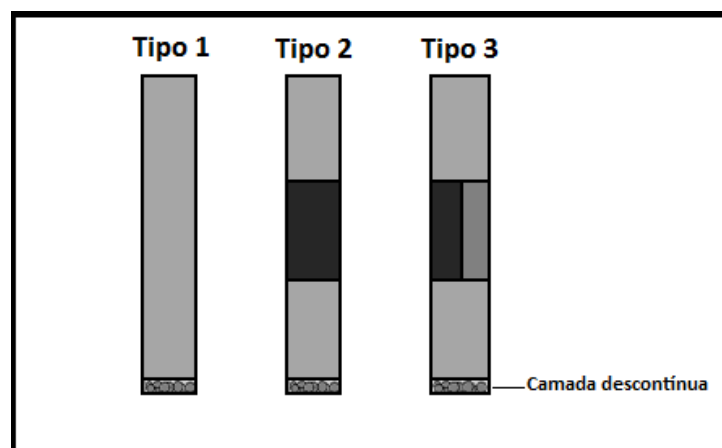


Figura 4.1 – Esquema representativo da disposição do meio poroso nas amostras

Durante a primeira série de injeções, o progresso do *grout* é gravado em vídeo permitindo observar de um modo mais preciso a sua evolução no tempo de injeção. Os primeiros registos vão proporcionar analisar o progresso do *grout* no interior das amostras, ao passo que, a segunda série

permite quantificar o *grout* injectado em função do tempo. A Figura 4.2, ilustra a disposição das diferentes granulometrias do meio poroso, nas onze amostras analisadas.

Constituição do meio poroso das amostras										
(G,G,G)	(G,M,G)	(G,F,G)	(F,G,F)	(G,M+F,G)	(G,M+f,G)	(G,G,M,G)	(G,G,F,G)	(G,G,f,G)	(G,M,F,G)	(G,M,f,G)
G G G	G M G	G F G	F G F	G M+F G	G M+f G	G G G	G G G	G G G	G M G	G M G
										Grosso (G) Médio (M) Fino (F) Mais fino (f) 50%Médio+50%Fino (M+F) 50%Médio+50%Mais fino (M+f)

Figura 4.2 – Esquema representativo da constituição das amostras analisadas

4.2. Análise do fluxo de *grout* no tempo de injeção em amostras com meio poroso seco

A apresentação de resultados que se segue é referente à análise dos gráficos de fluxo. Os gráficos de fluxo são a representação gráfica dos resultados da análise de imagens de vídeo das injeções. Durante a análise, o tempo é anotado a cada 3cm, permitindo analisar com o máximo rigor, para uma pressão de injeção de 0,5 bar, o progresso do *grout* nas amostras ao longo do tempo.

De forma a facilitar a compreensão do texto, a análise referida será efectuada separadamente consoante o tipo de amostra.

4.2.1. Amostra uniforme (tipo1)

A primeira injeção diz respeito à amostra (G,G,G) (tipo1), onde o cilindro foi totalmente preenchido com o meio poroso de maior granulometria conforme representado na Figura 4.3.

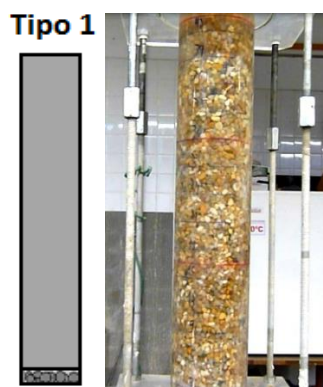


Figura 4.3 – Disposição do meio poroso na amostra uniforme (tipo1)

Com base nos resultados obtidos na Figura 4.4, pode-se constatar que o comportamento da curva de fluxo é quase linear, sendo os tempos de penetração do *grout* por camada semelhantes. Contudo, é possível verificar um ligeiro decréscimo da velocidade de penetração da mistura ao longo da altura de injeção. Este comportamento foi também observado em estudos anteriores [(Hunter, 2001), (Yamada et al., 2000)], que referem que um dos factores que pode estar envolvido neste comportamento é o aumento da resistência ao fluxo de *grout* com a altura de injeção. Ou seja, durante a injeção, uma percentagem da água constituinte do *grout* é perdida para o meio poroso. Ora quanto mais água é absorvida por parte do meio, menos fluido o *grout* se torna, levando a um abrandamento da injeção, dificultando assim o progresso do *grout* na amostra.

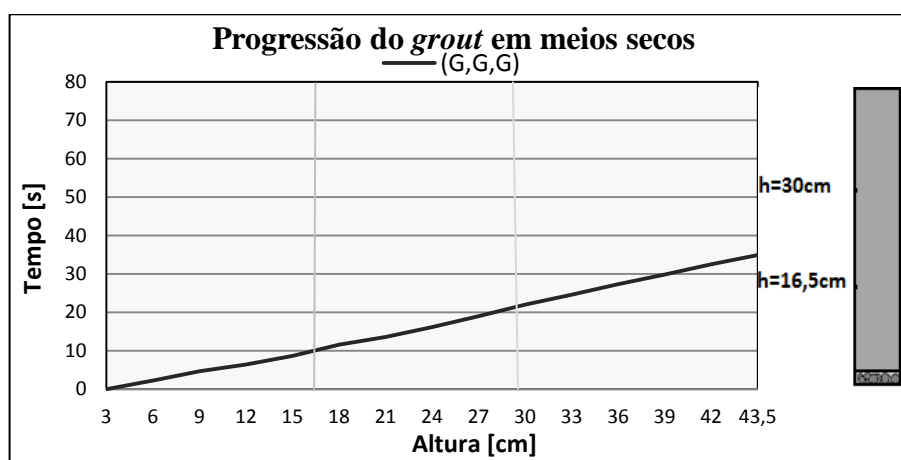


Figura 4.4 – Comportamento do fluxo de *grout* ao longo do tempo de injeção na amostra uniforme correspondentes ao (tipo1)

4.2.2. Amostras com fracções dispostas perpendicularmente à direcção do escoamento (tipo2)

Numa fase seguinte foram analisados os resultados obtidos relativamente à progressão do *grout* para uma série de amostras referentes ao (tipo2), em que o cilindro foi dividido horizontalmente em três fracções iguais dispostas perpendicularmente à direcção do escoamento, sendo a granulometria do meio poroso constituinte da fracção intermédia diferente das restantes, Figura 4.5.

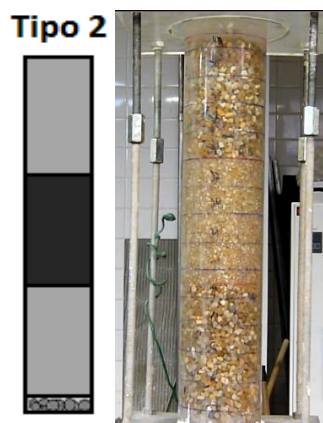


Figura 4.5 – Disposição do meio poroso nas amostras do (tipo2)

Esta disposição teve como objectivo analisar o comportamento do *grout* ao se deparar com zonas de diferentes permeabilidades, assim como analisar a influência desta heterogeneidade na injeção. O gráfico de fluxo seguinte representado na Figura 4.6, traduzem o progresso do *grout* nas amostras (G,M,G), (G,F,G) e (F,G,F) durante o tempo de injeção, possibilitando a comparação com a amostra constituída apenas por um meio completamente homogéneo (G,G,G).

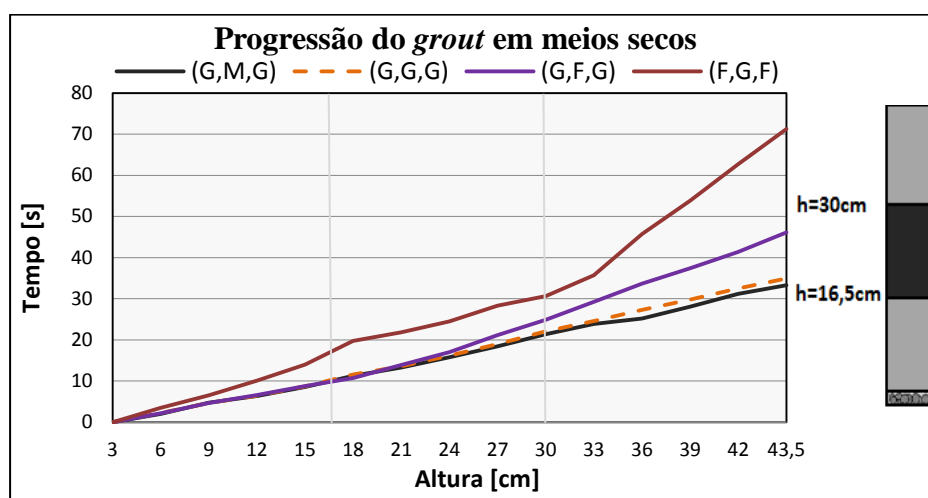


Figura 4.6 – Comportamento do fluxo de *grout* ao longo do tempo de injeção nas amostras correspondentes ao (tipo2)

Começando a análise pelo gráfico de fluxo correspondente à amostra (G,M,G) é possível verificar que, comparativamente à amostra (G,G,G), não existiu uma grande variação no comportamento da injeção. Outro aspecto curioso e tendo em conta o que foi observado no capítulo anterior, relativamente ao estudo da permeabilidade da fracção de cada amostra, não deixa de ser interessante observar que nem sempre o meio poroso mais permeável é o mais rápido de ser injectado.

O tempo de injeção na amostra (G,M,G), que possui menor permeabilidade em comparação com o meio completamente homogéneo, constituinte da amostra (G,G,G), foi inferior. Assim, parece haver outros parâmetros envolvidos para além da permeabilidade do meio poroso. Um desses

parâmetros é o volume total a injectar. Para o *grout* poder progredir, os vazios precisam de ser preenchidos, sendo que o meio poroso (G,G,G) contém um maior volume de espaços vazios comparativamente ao meio (G,M,G). No entanto, como se pode observar pela Figura 4.6, esta análise só parece fazer sentido para os meios constituintes por partículas de maior dimensão (Grosso e Médio). Para as amostras que contenham na sua constituição fracções de partículas mais finas, esta relação entre volume total a preencher e velocidade de escoamento não se verificou. A teoria da existência de uma frente de resistência, assim como a relação entre o tamanho das partículas sólidas do *grout* e o diâmetro de canais do meio a ser injectado são capazes de explicar também essa observação.

Ora através do comportamento evidenciado pela injeção de *grout* na amostra (G,F,G), pode-se observar que comparativamente às amostras anteriores foi evidente um abrandamento do fluxo de *grout* ao chegar a uma zona mais densa. A velocidade de penetração diminui significativamente na passagem do meio poroso de maior dimensão para o meio mais fino, constituinte da camada intermédia desta amostra. É ainda de realçar, que assim que o *grout* se deparara novamente com um meio mais grosseiro no último terço da amostra, a velocidade de penetração não atinge os valores iniciais. Neste caso, as partículas constituintes do meio da fracção intermédia, foram bastante influenciáveis no comportamento final do fluxo de *grout* da amostra. Com o menor caudal proveniente da fracção mais fina e um maior volume de vazios a preencher com a mudança para um meio mais grosseiro, a velocidade de penetração no último terço da injeção tem tendência a não recuperar os valores registados no início da injeção. Resultados que diferem dos observados anteriormente por Gil e Van Rickstal [(Gil, 1995), (Van Rickstal, 2000)]. Estes autores verificaram um aumento da velocidade de injeção, para valores próximos dos registados no primeiro terço da amostra, assim que o fluxo *grout* passou a fracção de menor granulometria.

Um efeito similar acontece quando um meio (Fino) de menor granulometria é colocado na parte inferior e superior da amostra, caso da amostra (F,G,F). Neste caso, foi possível verificar um início de injeção mais lento em relação às amostras que continham um meio poroso grosseiro na camada de base da amostra. Pode-se ainda observar diferenças mais significativas nas velocidades obtidas em cada fracção, verificando-se um ligeiro aumento da velocidade de penetração assim que a zona mais permeável é atingida. No entanto, no último terço da injeção as velocidades diminuem novamente assim que o fluxo de *grout* atinge a última fracção da amostra, constituída por um meio poroso de menor granulometria.

Ainda, tendo em conta a análise das amostras do (tipo 2), foram realizadas outras duas injeções referentes às amostras (G,M+F,G) e (G,M+f,G). Ambas apresentam uma mistura de dois meios porosos de diferentes granulometrias na fracção intermédia. A progressão do fluxo de *grout* ao longo do tempo de injeção nas amostras está representado na Figura 4.7.

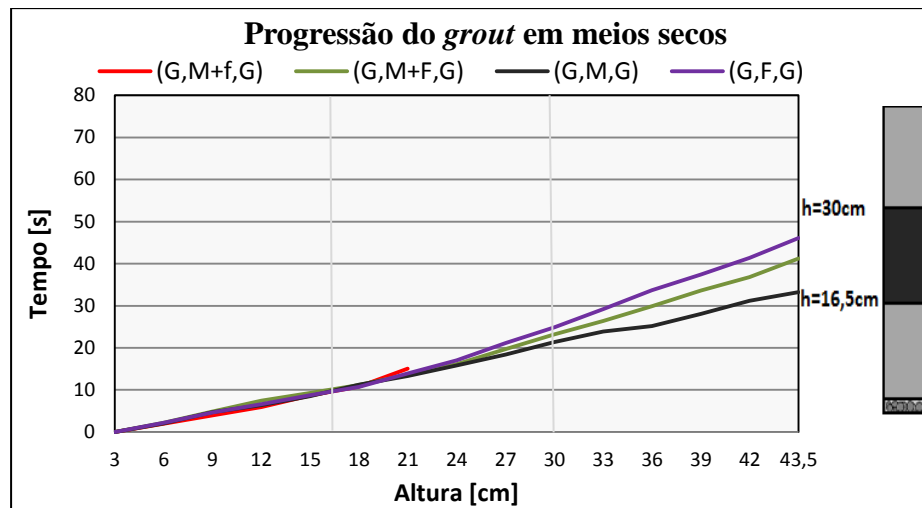


Figura 4.7 – Comportamento do fluxo de *grout* ao longo do tempo de injeção nas amostras correspondentes ao (tipo2)

Analisando os resultados obtidos, foi possível verificar que relativamente à amostra (G,M+F,G) o tempo total de injeção foi inferior ao verificado na amostra (G,F,G) e superior ao obtido para a amostra (G,M,G), concluindo neste caso que a permeabilidade da fracção intermédia das amostras teve uma grande influência nos tempos finais de injeção. Ou seja, amostras com meios porosos na fracção intermédia com menor permeabilidade apresentaram maiores tempos de injeção. No que se refere ao comportamento da injeção na amostra (G,M+f,G) observou-se que para fracções que contenham quantidades elevadas (50%) de partículas finas (0,5-1,18 mm), caso da fracção intermédia da amostra (G,M+f,G), o fluxo de *grout* é interrompido prejudicando a penetrabilidade da amostra Figura 4.8.



Figura 4.8 – Interrupção do fluxo de *grout* durante a injeção na amostra (G,M+f,G)

As partículas de menor dimensão, constituintes do meio poroso da camada intermédia, colmataram parcialmente os vazios existentes do meio poroso de fracção média, diminuindo a abertura

mínima à passagem do fluxo de *grout*. Ou seja, houve uma diminuição da razão entre o tamanho da abertura dos canais de fluxo e o tamanho máximo das partículas de *grout*, originando a interrupção do fluxo. Quando um aglomerado de partículas de *grout* se acumula na entrada ou interior de um vazio, impedindo a passagem do *grout*, dá-se a ocorrência de um efeito tampão. Este fenómeno, já referido anteriormente (Figura 2.5), denomina-se de filtração do *grout*. Semelhantes conclusões foram também verificadas por [(Gil, 1995), (Van Rickstal, 2000), (F. Jorne et al., 2015b)].

Esta dificuldade de penetração do *grout* em meios de granulometria fina pode ser justificada através dos Quadros 4.1 e 4.2. Como já foi observado, é possível relacionar a tendência de filtração com a dimensão das partículas sólidas do *grout*. Para uma suspensão granular (como um *grout* de cal hidráulica) ser capaz de penetrar em um determinado meio poroso, a dimensão das partículas sólidas da mistura devem ser compatíveis com as dimensões características do meio poroso (aberturas, vazios, interfaces, etc.) a ser injectado. Desse modo, as condições de penetração são frequentemente expressas em termos da relação (n) entre o tamanho das partículas sólidas do *grout* (d) e um diâmetro “representante” de canais a ser injectado (W_{nom}). Este rácio reflecte a necessidade prática de as partículas sólidas de *grout* serem significativamente menores que a abertura a característica ser penetrada.

No Quadro 4.1 encontram-se resumidas as condições, de acordo com a literatura existente, para uma penetração eficaz do *grout* no meio poroso.

Author	Criterion: $d < W_{nom}/n$	Grouted medium
Johnson	$d_{85} < W_{nom}/3.75$	Fine granular soil
Mitchell	$d_{100} < W_{nom}/3$	Fissured medium
Littlejohn	$d_{85} < W_{nom}/3.75$	Fine granular soil
Littlejohn	$d_{100} < W_{nom}/5$	Fissured medium
Hutchinso	$d_{max} < W_{nom}/3$	Fine granular soil
Cambeftor	$d_{100} < W_{nom}/1.5$ to 2	Fissured medium
Léonard	$d_{85} < W_{nom}/0.75$ to 3	Fine granular soil
Papadakis	$d_{100} < W_{nom}/1.5$ to 3	Fine granular soil
Paillère and Guínez	$d_{100} < W_{nom}/1.5$ to 2.3	Tests in “sand column”
Miltiadou-Fezans	$d_{85} < W_{nom}/5 \pm 1$	Tests in “sand column”
Miltiadou-Fezans	$d_{99} < W_{nom}/2$	Tests in “sand column”

d_{85} = diameter of the grout grain, corresponding to 85 % passing
 $d_{100} = d_{max}$ = “maximum” diameter of the grout grains

Quadro 4.1 – Condições de penetrabilidade das partículas sólidas do *grout* no meio poroso, de acordo a literatura existente, (adaptado de (F. Jorne et al., 2015b))

Neste estudo, optou-se por considerar apenas os critérios definidos por (Paillère e Guínez) e (Miltiadou-Fezans e Tassios), uma vez que resultam da avaliação de testes de penetração do *grout* em “colunas de areia”, condições semelhantes às dos ensaios realizados durante esta campanha experimental. Esses autores estudaram de uma forma mais precisa a relação que existe entre as diferentes classificações da dimensão das partículas sólidas do *grout* e a sua penetrabilidade. Foram

considerados diferentes valores para caracterizar o tamanho das partículas sólidas do *grout* (d) (neste caso foram usados os valores d_{85} , d_{99} ou d_{100} , que correspondem respectivamente ao tamanho da malha do peneiro através do qual passa 85%, 99% e 100% do ligante). Ora analisando o Quadro 4.2, é possível verificar que os valores que caracterizam a relação (n), entre o tamanho das partículas sólidas do *grout* (d) e um diâmetro representativo dos canais a ser injectado (W_{nom}), são inferiores aos sugeridos para considerar uma penetração eficaz do meio. Justificando assim o bloqueio ocorrido no meio poroso ($M+f$) constituinte da fracção intermédia da amostra ($G,M+f,G$).

Quadro 4.2 – Relação (n) entre o tamanho das partículas sólidas do *grout* (d) e um diâmetro de canais a ser injectado (W_{nom}), nos meios (fino) e (Médio+Fino)

			Designação Meio Poroso	
			Mais fino (f)	50%Médio+50%Mais fino (M+f)
<i>Grout</i>		W_{nom}	0,1	0,12
d_{85} [mm]	0,1	n	1,00	1,20
d_{99} [mm]	0,195	n	0,51	0,62
d_{100} [mm]	0,2	n	0,50	0,60
d_{max} [mm]	0,2	n	0,50	0,60

4.2.3. Amostras com fracções intermédias dispostas paralelamente à direcção do escoamento (tipo3)

Continuando o estudo de casos particulares de escoamentos em meios heterogéneos, analisa-se de seguida, o comportamento do fluxo de *grout* ao longo do tempo de injeção nas amostras correspondentes ao (tipo3), em que a fracção intermédia das amostras foi dividida verticalmente com dois meios porosos de diferentes granulometrias e onde o fluxo de *grout* tem direcção paralela à disposição das camadas, conforme apresentado na Figura 4.9.

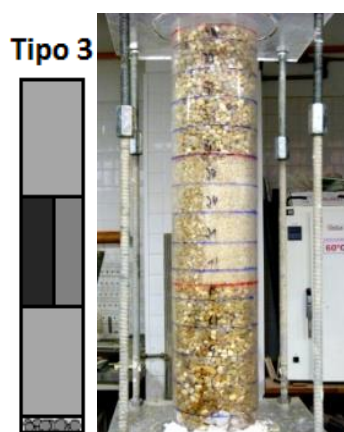


Figura 4.9 – Disposição do meio poroso nas amostras do (tipo3)

O comportamento representativo das injeções nestas amostras encontra-se retratado na Figura 4.10. Numa primeira fase, são analisadas as amostras compostas pelos meios porosos (Grosso), (Médio) e (Fino) na fracção intermédia. De seguida, é analisado o comportamento do fluxo de *grout* nas fracções constituídas por meios de menor granulometria, caso das amostras (G,G.f,G) e (G,M.f,G).

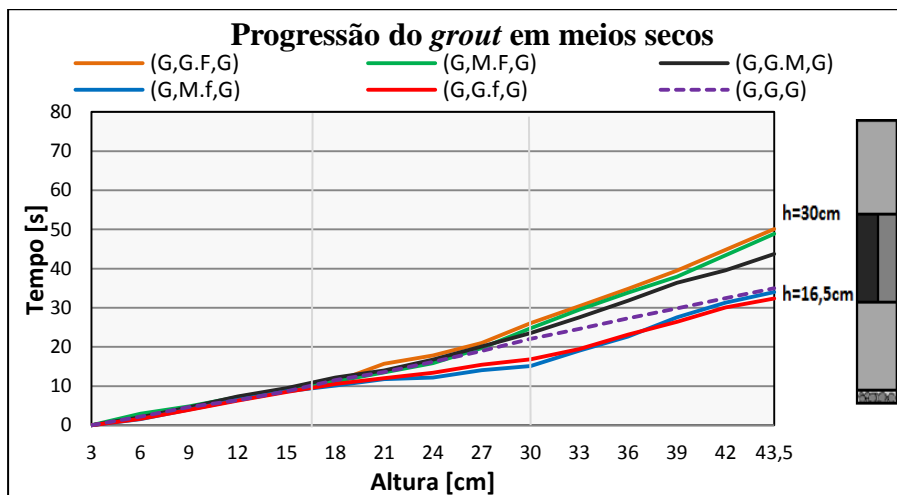


Figura 4.10 – Comportamento do fluxo de *grout* ao longo do tempo de injeção nas amostras correspondentes ao (tipo3)

Através da análise do gráfico de fluxo é possível observar-se que as amostras (G,G.F,G) e (G,M.F,G) obtiveram tempos de injeção muito semelhantes e ligeiramente superiores à amostra (G,G.M,G). A menor granulometria, assim como a maior resistência ao fluxo de *grout* proporcionada por os meios porosos constituintes da fracção intermédia destas amostras, podem justificar os resultados obtidos. Na Figura 4.11, é de resto visível, que o fluxo de *grout* através da camada intermédia da amostra (G,G.F,G) é maior na fracção da esquerda correspondente ao meio de maior granulometria, que possui maior permeabilidade em comparação ao meio (Fino). Este atraso ocorrido na fracção de menor permeabilidade da camada intermédia tem como consequência um aumento do tempo total de injeção da amostra, já observado no gráfico da Figura 4.10.

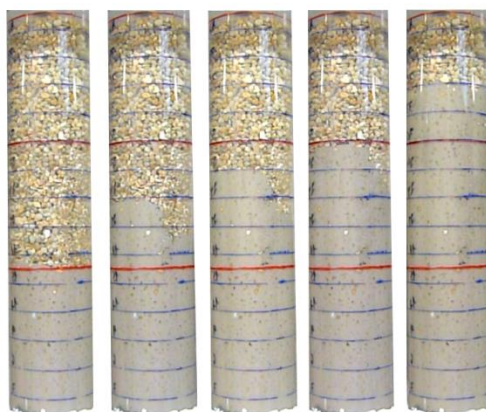


Figura 4.11 – Progressão do *grout* na amostra (G,G.F,G)

Quanto às amostras (G,G.f,G) e (G,M.f,G), é possível observar através da Figura 4.12, que retrata o aspecto visual das amostras antes e depois da injeção, que o *grout* foi incapaz de penetrar a fracção referente ao meio poroso fino, impedindo que esta zona ficasse consolidada. Uma vez mais, à semelhança do que foi observado para a amostra (G,M+f,G), este bloqueio pode ser justificado com os valores que caracterizam a relação (n), entre o tamanho das partículas sólidas do *grout* (d) e um diâmetro representativo dos canais a ser injectado (W_{nom}) apresentados no Quadro 4.2. Tendo-se verificado valores inferiores aos sugeridos para considerar uma penetração eficaz do meio, ocorrendo assim o bloqueio ao fluxo de *grout*.



Figura 4.12 – Exemplo de bloqueio ocorrido durante a injeção nas amostras (G,G.f,G) e (G,M.f,G)

Em relação aos tempos de injeção, em ambos os casos foi verificada uma progressão do *grout* mais rápida na fracção intermédia, assim como um tempo total de injeção inferior às restantes amostras. O facto de a injeção se dar apenas pela fracção mais permeável na zona intermédia, pode justificar os tempos de injeção obtidos, uma vez que, uma menor área de injeção implica um menor volume de *grout* a injectar, possibilitando uma maior velocidade de injeção nesta fracção. Foi ainda possível concluir, à semelhança do que já tinha sido observado por (Van Rickstal, 2000), que a capacidade de injeção de um *grout* sempre que há um fluxo de escoamento com direcção paralela à disposição das camadas e apesar de encontrar uma maior resistência na fracção constituída por um meio de partículas finas, este consegue progredir através da fracção mais permeável, não penetrando a parte mais densa. Ou seja, na presença de duas fracções de secção com área da mesma ordem de grandeza, o fluxo de escoamento dependerá fundamentalmente da menor resistência ao fluxo da fracção constituída por o meio poroso de maior permeabilidade.

4.3. Análise do fluxo de *grout* no tempo de injeção em amostras com o meio poroso pré-humedecido

Com o objectivo de avaliar o efeito que o teor em água do meio poroso tem na injectabilidade do *grout*, as amostras foram previamente humedecidas por uma simples injeção de água. À semelhança do que foi efectuado para as amostras secas, os tempos correspondentes à progressão do *grout* foram registados, possibilitando a comparação dos resultados obtidos.

Devido à grande semelhança de resultados, apresentam-se apenas os correspondentes a uma amostra de cada tipo, fundamentalmente das amostras contendo meios porosos de menor granulometria, que apresentaram maiores dificuldades de injeção no estado seco.

Analisando a Figura 4.13, representativas do comportamento da injeção nas amostras (G,G,G), (G,F,G) e (F,G,F) foi possível observar tempos de injeções de *grout* inferiores nas amostras pré-humedecidas, comparativamente às amostras secas. Comportamento também observado por autores como, [(Gil, 1995), (Van Rickstal, 2000), (F. Jorne et al., 2015a)], que verificaram a influência do teor de água do meio poroso como um factor capaz de influenciar a velocidade de injeção do *grout*.

Esta diferença de resultados obtidos para as amostras pré-humedecidas pode ser explicada considerando que a resistência ao fluxo é reduzida pela injeção de água, limpando os principais canais de escoamento, o que conduz a meios porosos com uma condutividade superior e consequentemente a uma maior velocidade de injeção. Um *grout* ao fluir através de um meio poroso relativamente seco, vai perder uma percentagem de água. Ora quanto mais água é absorvida pelo meio poroso, menos fluido o *grout* se torna, o que leva a um abrandamento da injeção, dificultando assim, o progresso do *grout* no meio poroso.

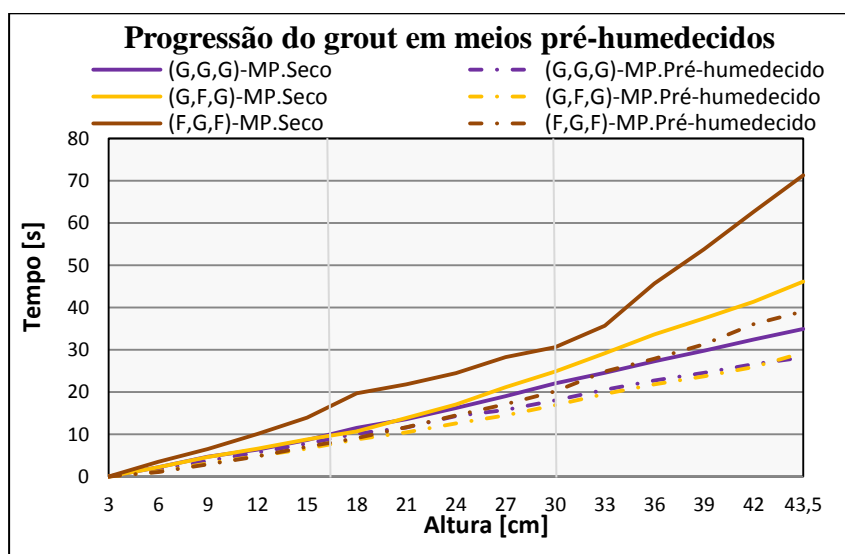


Figura 4.13 – Comportamento do fluxo de *grout* ao longo do tempo de injeção nas amostras correspondentes ao (tipo2) com meio poroso seco e pré-humedecido

É ainda importante constatar, que para as amostras pré-humedecidas que contenham na sua constituição meios porosos de granulometria mais fina, os tempos de injeção vão ter diferenças mais significativas comparativamente às amostras secas, como de resto é evidente através da Figura 4.13.

Uma explicação possível pode estar na maior capacidade de absorção de água destes meios, uma vez que, a inclusão de partículas finas num qualquer meio poroso conduz a que a área a envolver, pelo *grout* injectado (superfície específica), seja muito superior à existente em meios porosos com partículas de dimensões superiores, originando uma maior absorção de água por parte do meio.

Verifica-se ainda, que a diferença de velocidades entre fracções (Base, Meio e Topo) foi reduzida, podendo-se concluir que a resistência ao fluxo observada nos meios porosos secos com a mudança da granulometria das fracções foi menor.

No entanto, apesar de os tempos de injeção serem inferiores em todas amostras, o pré-humedecimento não resolveu os problemas de penetrabilidade do *grout* observados nas amostras (G,M+f,G), (G,G.f,G) e (G,M.f,G), tal como se pode observar na Figura 4.14, onde as fracções preenchidas por meios mais finos não foram injectadas.

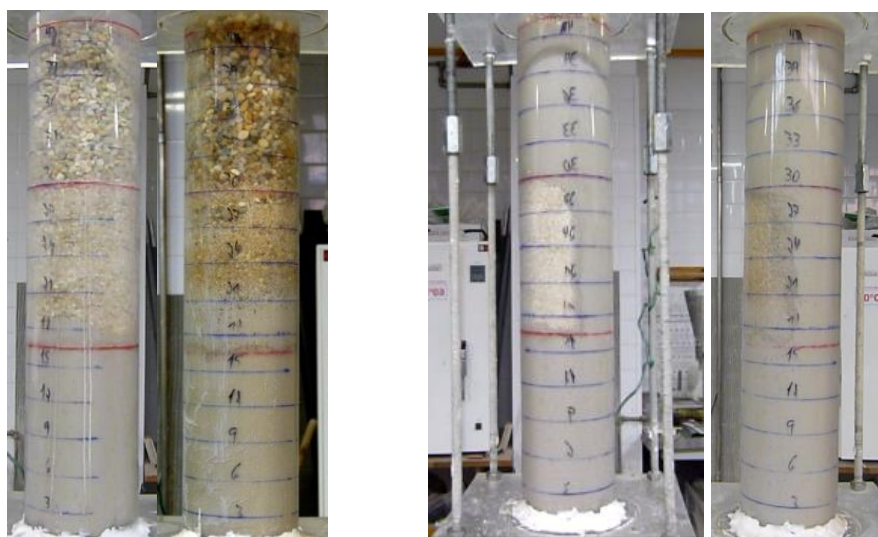


Figura 4.14 – Bloqueio ao fluxo de *grout* ocorrido durante a injeção nas amostras (G,M+f,G) (esq.), (G,G.f,G) e (G,M.f,G) (dir.), com o meio poroso seco e pré-humedecido

Jorne et al. (F. Jorne et al., 2015b) observou que a taxa de filtração dos meios porosos é influenciada pelo teor de água do meio poroso antes da injeção de *grout*, sendo que, meios pré-humedecidos apresentam menor tendência de filtração. No entanto, como já mencionado, este facto não resolve os problemas de penetrabilidade do *grout*.

A progressão do *grout* ao longo do tempo de injeção, nos meios porosos secos e pré-humedecidos das amostras (G,M+f,G) e (G,G.f,G), pode ser analisado na Figura 4.15, onde se pode verificar novamente um tempo de injeção inferior nas amostras pré-humedecidas. É ainda possível observar, através do gráfico de fluxo referente à amostra (G,M+f,G), que embora a velocidade de

injecção seja distinta em cada fracção, o fluxo de *grout* atingiu sensivelmente a mesma altura com o meio poroso húmido e com o meio poroso seco, permitindo concluir que o teor em água do meio não resolveu os problemas de injectabilidade da fracção fina.

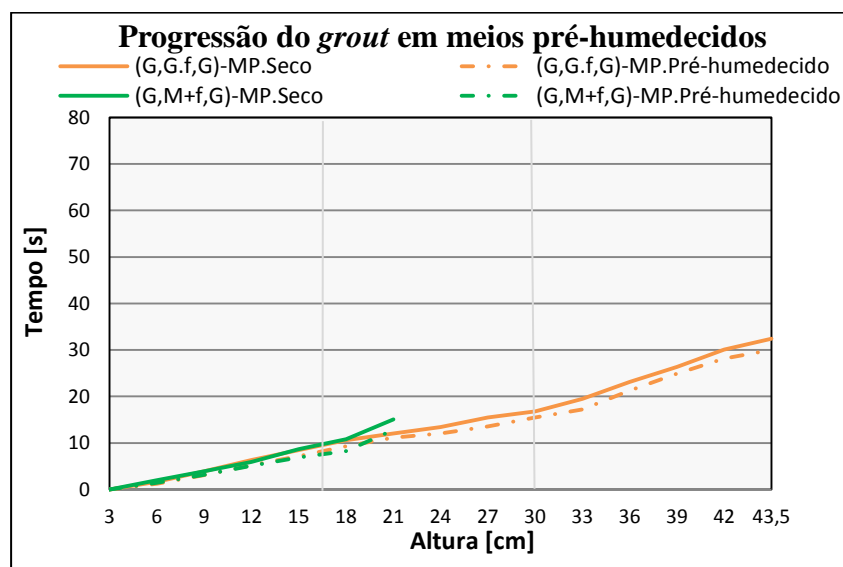


Figura 4.15 – Comportamento do fluxo de *grout* ao longo do tempo de injecção nas amostras correspondentes ao (tipo2 e 3) com meio poroso seco e pré-humedecido

A principal vantagem observada no pré-humedecimento das amostras está relacionada com o aumento da velocidade de injecção do *grout*, uma vez que a resistência ao fluxo é reduzida pela injecção de água. No entanto, de acordo com anteriores investigações [(Van Rickstal, 2000), (Coelho, 2013), (F. Jorne et al., 2015b)], o pré-humedecimento tem de ser utilizado com precaução, uma vez que origina resistências mecânicas muito baixas.

4.4. Análise do fluxo de massa

4.4.1. Amostras com meio poroso seco

Como mencionado anteriormente, o fluxo de massa foi registado ao longo do tempo de injecção. As curvas representativas da massa de *grout* injectada ao longo do tempo, para cada amostra, são apresentadas graficamente nas figuras seguintes (Figura 4.16 e Figura 4.17).

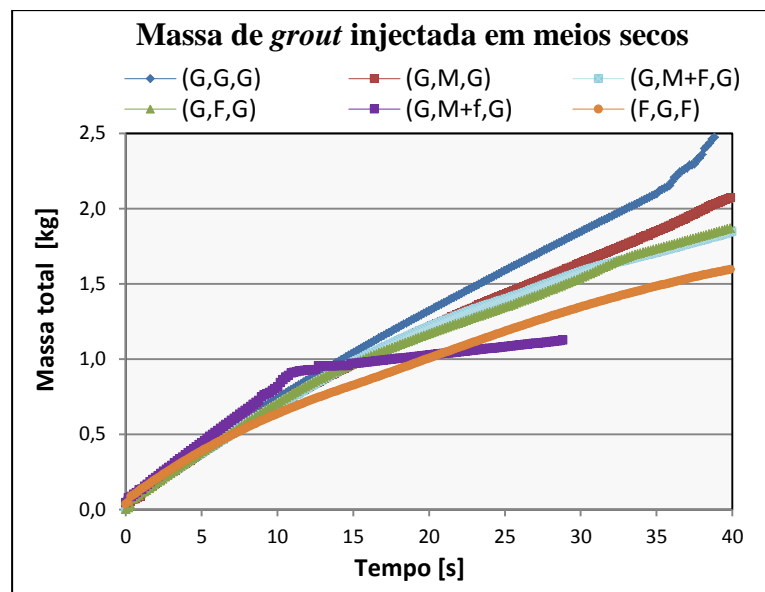


Figura 4.16 – Massa de *grout* injectada ao longo do tempo de injeção na amostra uniforme (G,G,G) e nas amostras correspondentes ao (tipo2)

Começando a análise da Figura 4.16, representativa das amostras do (tipo2), é possível verificar um comportamento semelhante das curvas durante a primeira parte do processo de injeção, tendo sido registados valores idênticos nos primeiros segundos correspondentes à injeção das bases das amostras preenchidas com o meio poroso (Grosso). Por outro lado, com a mudança da granulometria do meio na fracção intermédia das amostras, a inclinação das rectas é mais significativa, estando esta inclinação relacionada com a resistência encontrada pelo *grout* ao penetrar meios de menor granulometria. Comparando os resultados obtidos nas camadas intermédias de ambas as amostras, é evidente um aumento da massa de *grout* injectada para os meios porosos de granulometria superior, o que pode ser explicado através da menor resistência de fluxo encontrada nestes meios bem como um maior volume de poros, uma vez que o sistema de poros tem canais com vazios de abertura superior.

Verificou-se que a penetrabilidade do meio poroso é fortemente influenciada pelo tamanho da abertura dos poros, assim como a magnitude de áreas de contacto. Ora quanto mais fino for o meio poroso, menor será a abertura dos poros e maior a superfície específica, dificultando a penetrabilidade do *grout* e, consequentemente, a quantidade de *grout* injectado.

Resultados semelhantes foram obtidos nas amostras (G,M+F,G) e (G,M+f,G). Analisando, em primeiro lugar, o fluxo de massa registado ao longo do tempo de injeção na amostra (G,M+f,G), é possível observar que após uma penetração inicial, a inclinação da curva de injeção é mínima, o que significa que não foi registado um aumento da massa de *grout* durante aquele período de tempo, resultado de uma interrupção do fluxo no meio poroso da camada intermédia da amostra.

Relativamente ao comportamento evidenciado pela curva representativa da massa de *grout* injectada ao longo do tempo na amostra (G,M+F,G), é possível observar uma tendência da diminuição

da quantidade de massa de *grout* injectada ao longo do tempo.

Analisando de seguida os resultados referentes às amostras do (tipo3), apresentados na Figura 4.17, foi possível verificar-se novamente que meios porosos de granulometria superior e com um maior volume de vazios registaram valores superiores de massa de *grout* injectada. Semelhantes conclusões foram observadas por (F. Jorne et al., 2015b) referindo a importância do volume de vazios para a caracterização de alvenaria em termos de injectabilidade. Um maior volume de vazios está associado a valores de injectabilidade mais elevados.

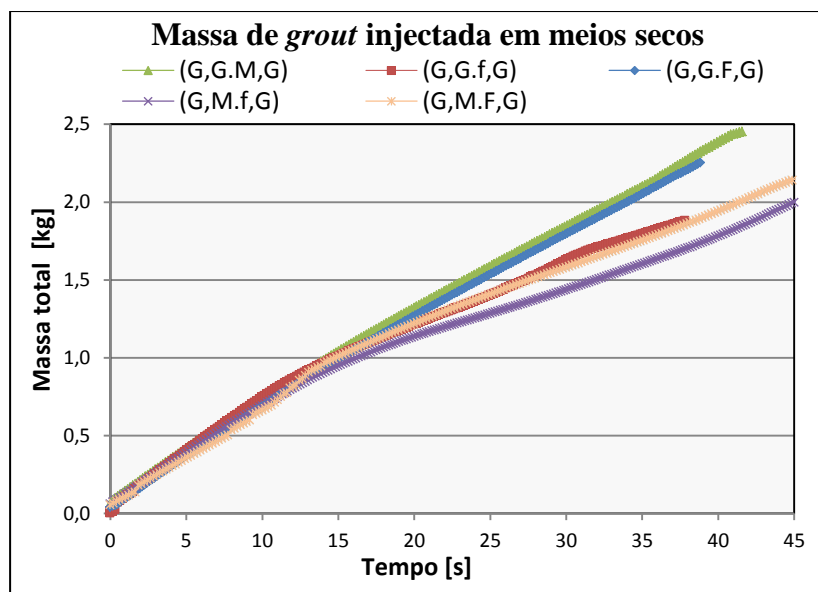


Figura 4.17 – Massa de *grout* injectada ao longo do tempo de injeção nas amostras correspondentes ao (tipo3)

4.4.2. Amostras com meio poroso pré-humedecido

À semelhança das amostras secas o fluxo de massa foi também registado ao longo do tempo de injeção nas amostras pré-humedecidas, permitindo a comparação entre os valores de injeção para os dois meios em ambas as amostras.

Ora, como já foi observado anteriormente, um meio poroso pré-humedecido permite uma maior velocidade de injeção, no entanto não resolve os problemas de penetrabilidade, nomeadamente para os casos das amostras que contenham meios de menor granulometria, apesar de se observar uma menor tendência de filtração nos meios porosos mais finos. Na verdade, como é evidente na Figura 4.14, pode-se observar um ligeiro aumento na altura de injeção atingida quando o meio poroso é pré-humedecido.

No entanto, a massa de *grout* injectada é inferior (Figura 4.18). Neste caso, o parâmetro com maior impacto é a absorção de água, por parte dos meios porosos. Ao ser absorvida mais água na fase de pré-humedecimento, fica livre um menor volume para o *grout* ser injectado. Na verdade, nestes

casos, o *grout* apenas fluirá através dos espaços vazios de maior dimensão, uma vez que no momento da injeção do *grout* os vazios mais finos já estão preenchidos com água, impedindo a penetração da *grout*, diminuindo assim a injectabilidade das amostras.

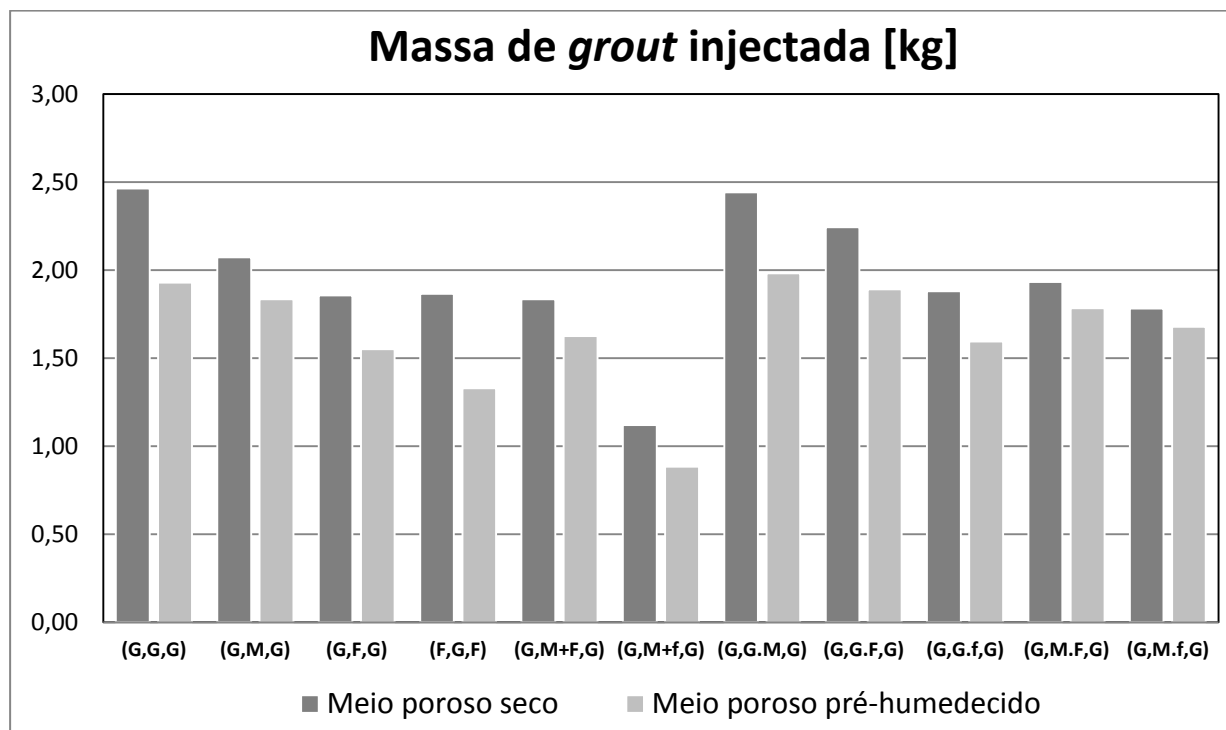


Figura 4.18 – Massa de *grout* injectada nas amostras com meio poroso seco e pré-humedecido

4.5. Avaliação da consolidação do *grout* nas diferentes amostras

Após a injeção, os cilindros foram mantidos 45 dias em laboratório, em condições normais de temperatura e humidade relativa ($T=20^{\circ}\text{C}$ e $HR=65\%$). Numa fase seguinte, as propriedades mecânicas das amostras foram avaliadas através da realização de dois tipos de ensaios distintos. Numa primeira fase foi realizado um ensaio de propagação de ultra-sons, a fim de recolher dados necessários à elaboração da análise tomográfica. De seguida, as amostras foram sujeitas a cortes transversais dos quais resultaram 3 fatias referentes à base, meio e topo das amostras. Por último, cada uma dessas fatias foi analisada através de ensaios de velocidade de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral (*Splitting Tensile Strength Test*). Importa ainda referir, que a presente dissertação foi elaborada em concomitância com a tese de doutoramento do Mestre Fernando Jorne, pelo que os modelos usados na injeção, para avaliar a consolidação do *grout* nos diferentes meios porosos, foram semelhantes aos usados em anteriores investigações [(Coelho, 2013),(Guerreiro, 2014), (Telha, 2015)].

4.5.1. Ensaio de ultra-sons Vs. Ensaio de resistência à tracção por compressão diametral

De forma a facilitar a compreensão do texto, a análise referida será efectuada separadamente e de acordo o tipo de amostras.

4.5.1.1. Amostras com fracções dispostas perpendicularmente à direcção do escoamento (tipo2)

Após o corte dos cilindros foi possível fazer uma inspecção do grau de sucesso da injeção em termos de penetração e difusão do *grout* no interior das amostras. Numa primeira fase são analisadas as amostras (G,G,G), (G,M,G), (G,F,G) e (F,G,F), tendo sido possível observar, em relação à grande maioria, uma elevada eficácia da injeção, como de resto se pode verificar na Figura 4.19.

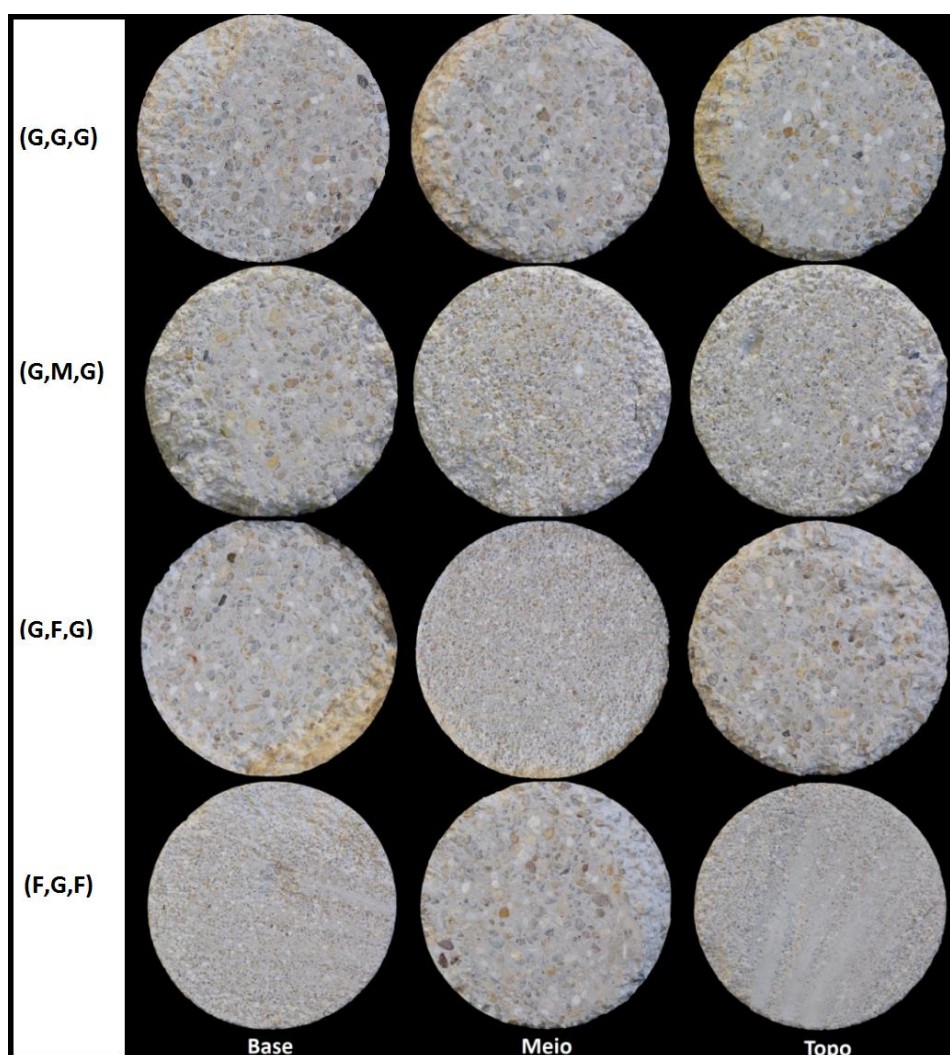


Figura 4.19 – Aspecto das faces superiores das fatias correspondentes à base, meio e topo das amostras (G,G,G), (G,M,G), (G,F,G) e (F,G,F), após corte dos cilindros

Os resultados referentes aos ensaios ultra-sónicos e mecânicos nas amostras são apresentados no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Resultados dos ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral nas amostras do (tipo2) e na amostra uniforme (G,G,G) (tipo1)

Grout 1,2%SP ; 0,5bar						
Identificação da amostra	Velocidade de ultra-sons [m/s]			Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]		
	Localização da fatia			Localização da fatia		
	Base	Meio	Topo	Base	Meio	Topo
(G,G,G)	2233	2383	2218	0,46	0,50	0,48
(G,M,G)	2150	2255	2147	0,45	0,49	0,46
(G,F,G)	2214	2049	2189	0,46	0,36	0,39
(F,G,F)	2103	2322	2013	0,34	0,40	0,33

Começando pela análise dos resultados relativos ao ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons, pode-se observar uma grande semelhança entre os valores obtidos em todas as amostras. Esta homogeneidade nos resultados é comprovada pelo aspecto das faces das fatias apresentadas na Figura 4.19, que como se pode observar, não diferem muito entre si.

Analisando as amostras (G,G,G) e (G,M,G) em simultâneo, os valores máximos foram registados nas fatias intermédias. Quanto a uma possível justificação, pode estar relacionada com a relação água/ligante apresentada pelo *grout* nessa zona. Tendo em conta que o meio constituinte da amostra (G,G,G) não varia ao longo do escoamento e que na amostra (G,M,G), apesar da variação na fracção intermédia, a granulometria dos dois meios constituintes é semelhante. Possivelmente, esta foi a zona onde o *grout* adquiriu a relação óptima água/ligante e, conseqüentemente, onde obteve melhor capacidade de penetração dos vazios, proporcionando também uma melhor qualidade das ligações entre o agregado e o *grout*.

Em relação à amostra (G,F,G) é possível observar um decréscimo das velocidades ultra-sónicas, na camada intermédia da amostra, que comparativamente às amostras (G,G,G) e (G,M,G), é constituída por um meio poroso de granulometria mais fina. Ora uma vez que a velocidade de propagação varia com a massa volúmica do material, sendo tanto maior quanto maior for a densidade do meio e que um material mais compacto resulta num menor volume de vazios, pode-se concluir que esta diminuição das velocidades ultra-sónicas na camada intermédia da amostra (G,F,G) aparenta estar relacionada com a compacidade do meio. Sendo que, como foi observado em capítulos anteriores, um meio composto por partículas mais finas tem menor capacidade de injeção, o que aumenta a possibilidade da existência de um maior número de vazios e, conseqüentemente, um meio que proporciona piores condições de propagação acústica.

Outra explicação possível, e de acordo com o observado em investigações anteriores (Coelho, 2013), é que um meio que possui partículas finas na sua composição tem uma maior quantidade de

interfaces agregado-*grout* e, conseqüente, uma maior quantidade de perdas de energia por dispersão, o que proporciona, também, a existência de menores velocidades de propagação.

Por último, os resultados referentes à amostra (F,G,F) mostram que a disposição do meio poroso de menor granulometria teve influência nos resultados obtidos, ou seja, comparativamente à amostra (G,F,G) registou-se velocidades superiores na fracção intermédia da amostra. Embora se possa constatar, que as velocidades mais baixas foram novamente registadas nas fatias constituídas por o meio (Fino).

Relativamente aos resultados obtidos nos ensaios de resistência à tracção por compressão diametral e começando por analisar as amostras (G,G,G) e (G,M,G), verificou-se que ambas registarem valores superiores na fatia do meio.

Por sua vez, a amostra (G,F,G) apresentou o valor mais alto na fatia referente à base da amostra e o valor mais baixo na fatia intermédia constituída por o meio poroso (Fino). Importa ainda referir que, quanto mais fina é a granulometria da fracção intermédia das amostras menor o valor obtido no ensaio e maior influência sobre os valores obtidos na camada correspondente ao topo das amostras. Ou seja com a introdução de meios de menor granulometria na fracção intermédia das amostras foi observado uma diferença mais significativa entre os valores obtidos nas fatias referentes à base e ao topo das amostras. No caso da amostra (G,F,G) houve uma perda de cerca de 15% das resistências entre a camada de base e topo.

Finalmente, analisando os valores do ensaio mecânico para a amostra (F,G,F), os valores mais altos foram registados na fatia intermédia. As fracções de granulometria fina surgem novamente associadas aos baixos valores de resistências mecânicas. A pior fluidez do *grout* observada para estes meios porosos, traduz-se numa menor capacidade de penetração dos vazios, prejudicando as ligações entre o *grout* e as partículas do meio poroso, originando resistências mecânicas mais baixas, resultantes de uma transferência de tensões menos eficiente na interface *grout*/meio poroso.

Comparando os resultados de ambos os ensaios, é possível observar, a existência de uma relação entre a velocidade de ultra-sons e a resistência mecânica para todas as amostras. Os maiores valores observados para os ensaios ultra-sónicos correspondem aos maiores valores de resistência mecânica registados na maioria das amostras. Ainda assim, as resistências mecânicas aparentam estar relacionadas com algo mais do que apenas a compacidade e densidade do meio. O ensaio de resistência à tracção por compressão diametral é condicionado, principalmente, pela qualidade das ligações entre o agregado e o *grout*, um menor número de interfaces existente nos meios porosos de maiores dimensões favoreceu a obtenção de valores de resistência mecânica superiores.

Ainda analisando as amostras com divisão horizontal, compara-se de seguida os resultados apresentados no Quadro 4.4, referentes às amostras (G,M+F,G) e (G,M+f,G). De referir que neste caso a fracção intermédia é composta por 50% de partículas de dimensão média e 50% de partículas Finas.

O estado das fatias após o corte das amostras é apresentado na Figura 4.20.

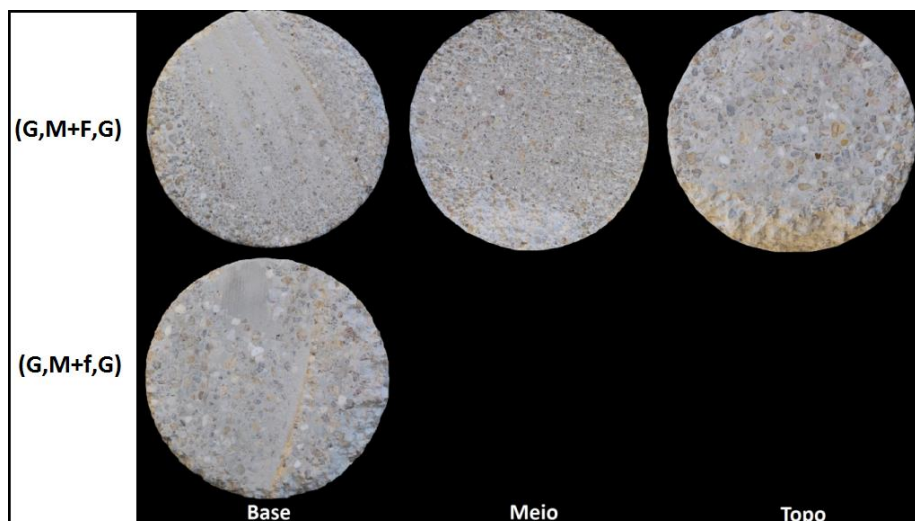


Figura 4.20– Aspecto das faces superiores das fatias correspondentes à base, meio e topo das amostras (G,M+F,G) e (G,M+f,G), após corte dos cilindros

Quadro 4.4 – Resultados dos ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral nas amostras do (tipo2)

Grout 1,2%SP ; 0,5bar						
Identificação da amostra	Velocidade de ultra-sons [m/s]			Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]		
	Localização da fatia			Localização da fatia		
	Base	Meio	Topo	Base	Meio	Topo
(G,M+F,G)	2193	2103	2156	0,47	0,38	0,43
(G,M+f,G)	2168	x	x	0,45	x	x
X-fluxo de grout interrompido						

Começando pela análise dos resultados obtidos no ensaio ultra-sónico referentes à amostra (G,M+F,G), pode-se observar uma grande semelhança entre as velocidades, sendo praticamente constantes ao longo da altura da amostra, o que de resto é confirmado pelas fotografias das fatias apresentadas na Figura 4.20. No entanto, os valores mais baixos foram registados para a fatia do meio.

Relativamente à análise dos valores do ensaio mecânico, verificou-se uma diminuição das resistências na fracção intermédia constituída por o meio poroso (M+F), com as camadas correspondentes à base e topo da amostra a apresentarem valores superiores. Uma vez mais a explicação pode estar na coesão das ligações entre o *grout* e as partículas constituintes do meio poroso de maior granulometria. A maior dimensão das partículas constituintes deste meio possibilita um menor número de interfaces agregado-*grout*, favorecendo a obtenção de maiores valores de resistência mecânica, comparativamente a fatia intermédia constituída por meios porosos de granulometria mais fina.

Quanto à amostra (G,M+f,G) a injeção não foi completa, uma vez que o fluxo de *grout* foi interrompido na fracção intermédia da amostra, tendo apenas penetrado 4cm desta camada. Pelo que apenas foi possível analisar a fatia referente à base da amostra, tendo esta apresentado valores

referentes aos dois ensaios muito semelhantes aos obtidos para as fatias correspondentes às bases das restantes amostras.

4.5.1.2. Amostras com fracções dispostas paralelamente à direcção do escoamento (tipo3)

Nesta secção são apresentados os resultados das amostras correspondentes ao tipo3. A Figura 4.21, retrata o estado das amostras após o corte das fatias.



Figura 4.21 – Aspecto das faces superiores das fatias correspondentes à base, meio e topo das amostras (G,G.M,G), (G,G.F,G), (G,G.f,G), (G,M.F,G) e (G,M.f,G), após corte dos cilindros

Os resultados obtidos para ambos os ensaios, referentes às amostras (G,G.M,G), (G,G.F,G), (G,G.f,G), (G,M.F,G) e (G,M.f,G) são apresentados no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Resultados dos ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral nas amostras do (tipo3)

Grout 1,2%SP ; 0,5bar						
Identificação da amostra	Velocidade de ultra-sons [m/s]			Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]		
	Localização da fatia			Localização da fatia		
	Base	Meio	Topo	Base	Meio	Topo
(G,G.M,G)	2301	2259	2140	0,46	0,43	0,42
(G,G.F,G)	2206	2180	2113	0,43	0,40	0,39
(G,G.f,G)	2109	x	2058	0,40	x	0,35
(G,M.F,G)	2200	2190	2167	0,42	0,39	0,40
(G,M.f,G)	2237	x	2131	0,43	x	0,37
X-fluxo de grout interrompido						

Começando por analisar os resultados relativos aos ensaios ultra-sónicos, verificou-se a existência de um gradiente negativo da velocidade de ultra-sons, ao longo da altura das amostras, com os valores máximos a serem registados nas fatias da base de ambas as amostras. Por outro lado, nas amostras (G,G.f,G) e (G,M.f,G), tendo em conta que as fatias intermédias não apresentaram uma injeção bem-sucedida, esta análise foi impossibilitada pelo vazio de grandes dimensões causado pela incapacidade do *grout* em penetrar o meio poroso fino. Comparando ainda as fatias intermédias de todas as amostras é notória uma diminuição das velocidades de propagação, à medida que a granulometria do meio poroso diminui. Outra relação possível é a quantidade de massa de *grout* injectada nos diferentes meios porosos com as velocidades ultra-sónicas obtidas, onde menores velocidades ultra-sónicas surgem associadas a uma menor quantidade de *grout* injectado (observado anteriormente).

Quanto aos resultados obtidos no ensaio mecânico, estão em consonância com os resultados das velocidades ultra-sónicas. Tendo-se verificado uma diminuição das velocidades ultra-sónicas e das resistências mecânicas ao longo da altura da amostra., com os valores máximos a serem registados nas fatias da base para a generalidade das amostras. Neste caso, foi notório a influência da heterogeneidade do meio, constituinte da camada intermédia, nos resultados obtidos. O facto de o ensaio se realizar no sentido onde se separa as duas fracções constituintes da camada, pode ter alguma influência nos resultados. Sabendo que este ensaio é condicionado pela qualidade das ligações entre o agregado e o *grout*, o menor número destas interfaces existente nos meios mais grosseiros favoreceu a obtenção de maiores valores de resistência mecânica.

Importa salientar, uma vez mais, que nas amostras (G,M.f,G) e (G,G.f,G), a análise para ambos os ensaios só foi possível para as fatias correspondentes à base e topo da amostra, devido ao facto da fatia intermédia não apresentar condições geométricas para a realização dos ensaios.

4.6. Tomografia ultra-sónica

Nesta secção os tomogramas ultra-sónicos, obtidos segundo o método descrito no capítulo 3, são comparados com os resultados mecânicos e com o registo fotográfico realizado após o corte dos cilindros, no qual resultaram as 3 “fatias” correspondentes à base, meio e topo das amostras. A apresentação dos resultados é feita de acordo o tipo de amostras conforme efectuado anteriormente.

4.6.1. Amostras com fracções dispostas perpendicularmente à direcção do escoamento (tipo2)

Na Figura 4.22, apresentam-se os tomogramas ultra-sónicos da amostra uniforme (G,G,G) e das amostras constituídas por três fracções combinando diferentes granulometrias.

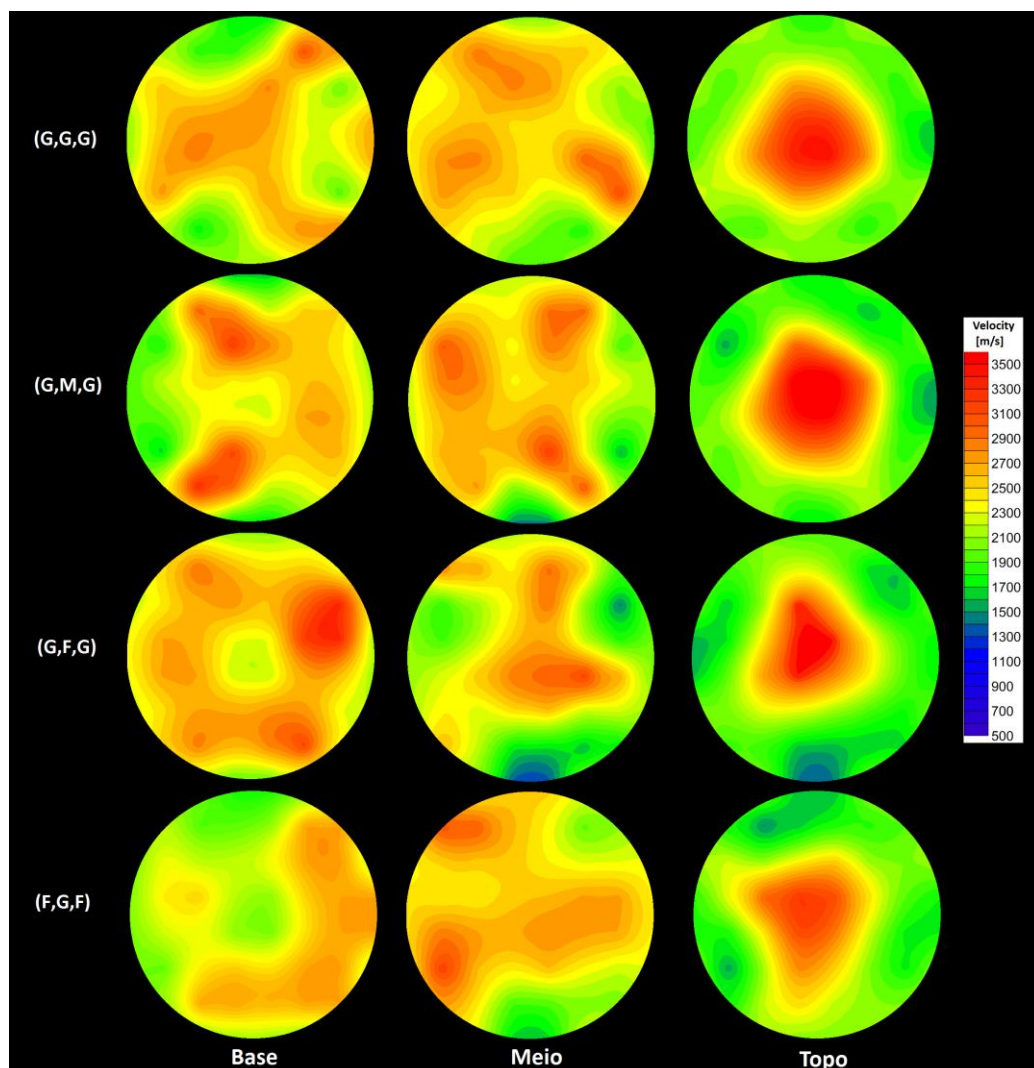


Figura 4.22 – Tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras (G,G,G), (G,M,G), (G,F,G), (F,G,F)

Os resultados mostram valores elevados de velocidades ultra-sónicas ao longo da altura das amostras, representados nos tomogramas por cores em tons de amarelo e laranja, indicando zonas sólidas sem espaços vazios, sinónimo de injeções bem conseguidas. Pode-se ainda observar que os tomogramas são muito semelhantes entre as amostras, o que vai de encontro aos resultados obtidos nos ensaios mecânicos.

Analisando individualmente cada amostra e começando pelos tomogramas referentes à amostra (G,G,G), é notório uma ligeira subida das velocidades ultra-sónicas da base para camada intermédia da amostra, representada nos tomogramas por uma maior área de cores avermelhadas. Estes resultados estão de acordo com o que foi observado anteriormente nos ensaios ultra-sónicos e mecânicos, em que foi registado valores mais elevados nesta zona da amostra (G,G,G), comprovando assim a maior compacidade desta zona.

Quanto à amostra (G,M,G) os tomogramas evidenciam um aumento, ainda que ligeiro, das velocidades ultra-sónicas na camada intermédia preenchida por um meio poroso de granulometria média. Ainda assim, comparativamente à amostra (G,G,G) os tomogramas representativos das fatias do meio e topo apresentam zonas azuladas, correspondentes a velocidades ultra-sónicas mais baixas que estão na origem de zonas com menor compacidade.

Finalmente analisando os tomogramas da amostra (G,F,G) é possível observar, que ao contrário das amostras (G,G,G) e (G,M,G), os resultados apresentam um decréscimo das velocidades ultra-sónicas ao longo da altura da amostra, onde as áreas respeitantes às zonas com maior registo de velocidades ultra-sónicas (3000 m/s) aparentam ser superiores na fatia da base. A granulometria da camada intermédia parece ter influência nestes valores, uma granulometria fina, aumenta a probabilidade da ocorrência de fenómenos de filtração e de bloqueios à passagem do *grout*. Ora, vazios não preenchidos presentes no meio, originam amostras com menor compacidade, proporcionando a obtenção de zonas com menores valores de velocidades ultra-sónicas, representadas nos tomogramas por zonas azuladas. Estas zonas azuladas são observadas em maior quantidade na fatia do meio e topo, justificando assim o decréscimo de velocidades observado ao longo da altura da amostra (G,F,G). Os tomogramas corroboram as conclusões retiradas nos ensaios mecânicos e ultra-sónicos observados anteriormente.

Quanto aos tomogramas referentes à amostra (F,G,F), a fatia do meio parece ser a que apresenta melhores resultados de velocidades ultra-sónicas, sendo possível observar uma maior área alaranjada no tomograma. De notar ainda, que as fatias correspondentes à base e topo da amostra registaram valores inferiores em comparação com as fatias correspondentes da amostra (G,F,G). Comparando ambas as amostras são notórios piores resultados ultra-sónicos nas fatias constituídas por o meio poroso (Fino), confirmando a pior injectabilidade já observada anteriormente para estes meios.

Em seguida, através da análise da Figura 4.23, é possível verificar que os resultados podem ainda ser confirmados através dos tomogramas 3D. De notar, ainda, que a os tomogramas 3D das amostras, com uma maior quantidade de meios porosos de granulometria (Fina), são representados por

cores mais esverdeadas e com menos zonas em tons de laranja, representativas de zonas com maior compacidade.

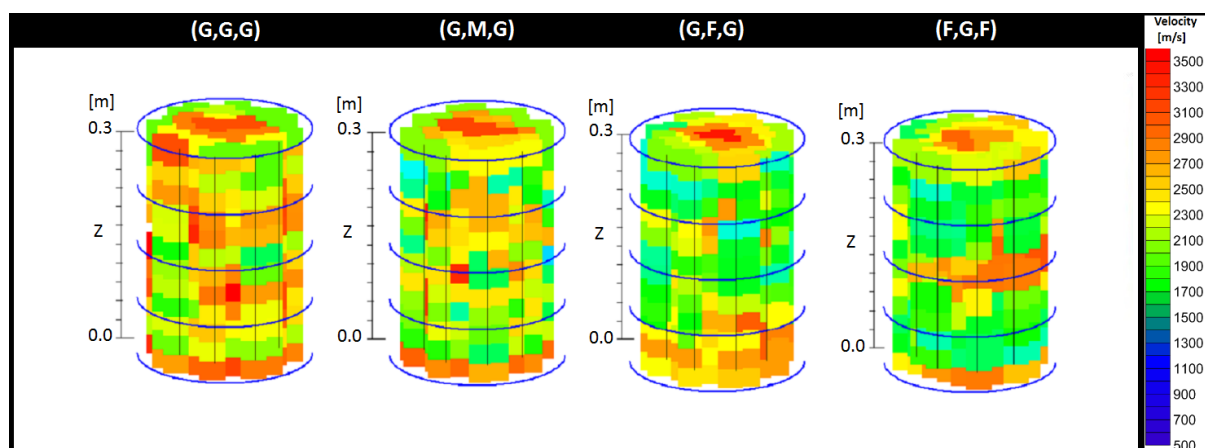


Figura 4.23 – Tomogramas 3D (dir.) das amostras (G,G,G), (G,M,G), (G,F,G) e (F,G,F)

Foram ainda analisados, os tomogramas referentes às amostras (G,M+F,G) e (G,M+f,G) representados na Figura 4.24, onde a fatia intermédia é composta por dois meios porosos de diferentes granulometrias.

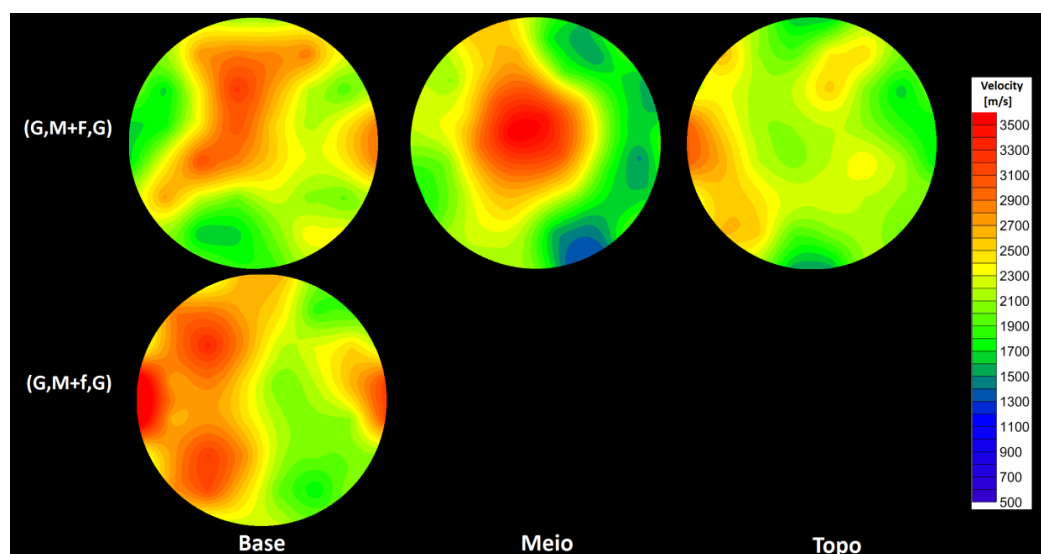


Figura 4.24 – Tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras (G,M+F,G) e (G,M+f,G)

Analisando os tomogramas, pode-se observar menores velocidades ultra-sónicas registadas na fatia intermédia da amostra (G,M+F,G), sendo ainda perceptível velocidades superiores, correspondentes a meios com melhor compacidade, nas fatias de base e topo da amostra, constituídas por o meio de maior granulometria (Grosso). Por outro lado, quanto aos tomogramas obtidos para a amostra (G,M+f,G), apenas foi possível analisar a fatia de base, devido aos problemas de injectabilidade verificados neste meio. Podendo-se observar um tomograma com grandes semelhanças

aos obtidos, para a base das amostras, analisadas até aqui. O tomograma 3D apresentado na Figura 4.25, retrata com grande semelhança o estado da amostra.

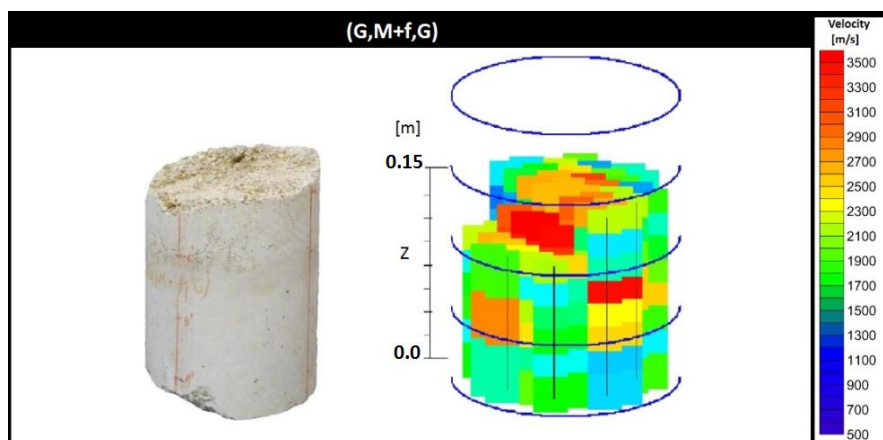


Figura 4.25 – Amostra (G,M+f,G): fotografia (esq.) e tomograma 3D (dir.) da amostra

4.6.2. Amostras com fracções dispostas paralelamente à direcção do escoamento (tipo3)

Os tomogramas ultra-sónicos referentes às amostras do tipo3 encontram-se representados nas Figura 4.26 e 4.28. Numa primeira fase analisam-se as amostras (G,G.M,G), (G,G.F,G) e (G,G.f,G), sendo de seguida analisadas as amostras (G,M.F,G) e (G,M.f,G).

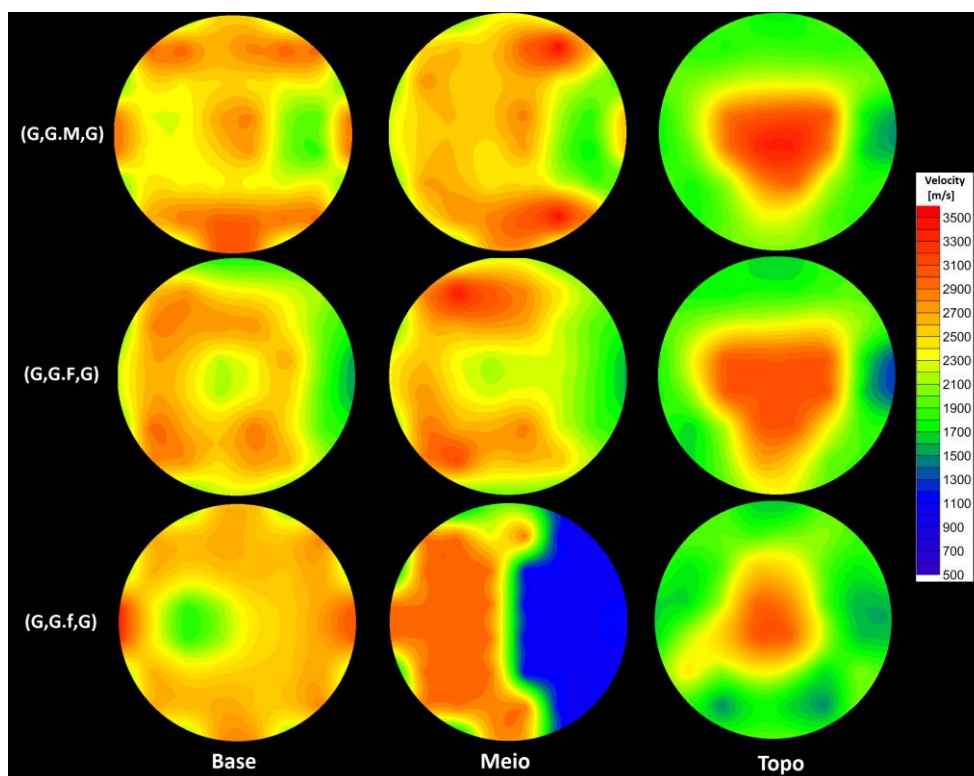


Figura 4.26 – Tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras (G,G.M,G), (G,G.F,G) e (G,G.f,G)

Em relação aos tomogramas observados na Figura 4.26, a maioria apresenta valores de velocidades ultra-sónicas correspondentes a meios com boa compacidade, comprovando uma vez mais o sucesso das injeções. A única excepção é o tomograma referente à fatia do meio da amostra (G,G.f,G), que apresenta uma área relativamente grande correspondente a baixas velocidades ultra-sónicas, indicando a presença de um grande vazio.

Analisando os resultados da amostra (G,G.M,G) a comparação entre as velocidades médias das fatias não é completamente esclarecedora, embora os tomogramas aparentem demonstrar velocidades ultra-sónicas ligeiramente superiores na camada referente à base da amostra, onde se observa uma área superior correspondente a velocidades máximas (3500 m/s). É ainda possível verificar, através do tomograma referente à fatia do meio, duas zonas distintas de velocidades, o que se enquadra na disposição dos meios porosos na amostra. A zona alaranjada representativa de maiores velocidades ultra-sónicas encontra-se no lado do meio poroso (Grosso), ao passo que, no lado correspondente ao meio poroso (Médio) as velocidades são menores, estando de acordo com o observado anteriormente, onde se verificou maiores velocidades ultra-sónicas para meios com maior capacidade de injeção.

Quanto à análise dos tomogramas da amostra (G,G.F,G), os resultados parecem evidenciar uma diminuição das velocidades ultra-sónicas, ao longo da altura da amostra. O tomograma da fatia do meio parece indicar duas zonas com diferentes compacidades, onde a zona correspondente a menores velocidades é apresentada do lado direito do tomograma (preenchida a verde). De notar que, comparativamente à amostra (G,G.M,G), a fatia do topo apresenta uma maior quantidade de zonas azuladas, correspondentes a menores velocidades ultra-sónicas. Uma justificação possível pode estar na menor capacidade de injeção da camada intermédia, diminuindo o fluxo de *grout* na fatia de topo, deste modo, o *grout* penetra em menos zonas do meio poroso, dando origem a um meio com menor compacidade, proporcionando, assim, a obtenção de menores velocidades ultra-sónicas.

Por último, procede-se à análise dos tomogramas da amostra (G,G.f,G), onde se pode verificar um decréscimo das velocidades da base para o topo da amostra. O tomograma da fatia intermédia permite ainda, observar um padrão de cores correspondente a duas zonas com velocidades ultra-sónicas distintas. Uma velocidade superior na região compacta do cilindro e uma velocidade inferior na zona (preenchida a azul), onde foi detectado um grande vazio, comprovado também pelo tomograma 3D do provete inteiro apresentado na Figura 4.27. Desta forma, os vazios observados no tomograma denotam a ocorrência de fenómenos de bloqueio, por parte do meio poroso de menor granulometria, ao fluxo de *grout*, tendo o escoamento se dado pelo meio poroso mais permeável.

Relativamente ao tomograma, referente à fatia do topo, este apresenta valores de velocidades ultra-sónicas inferiores em comparação com as restantes amostras. O menor volume de *grout* no último terço da amostra, resultante do bloqueio ocorrido na fatia intermédia, pode servir como justificação para uma menor dissipação do *grout* no meio poroso, originando zonas com menos compacidade.

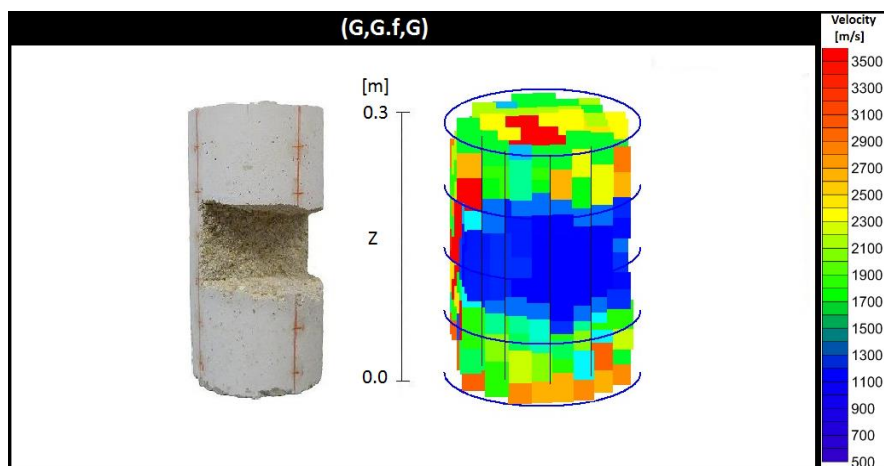


Figura 4.27 – Amostra (G,G.f,G): fotografia (esq.) e tomogramas 3D (dir.) da amostra

De seguida abordam-se outras duas amostras pertencentes a esta secção, neste caso os tomogramas da Figura 4.28, dizem respeito às amostras (G,M.F,G) e (G,M.f,G).

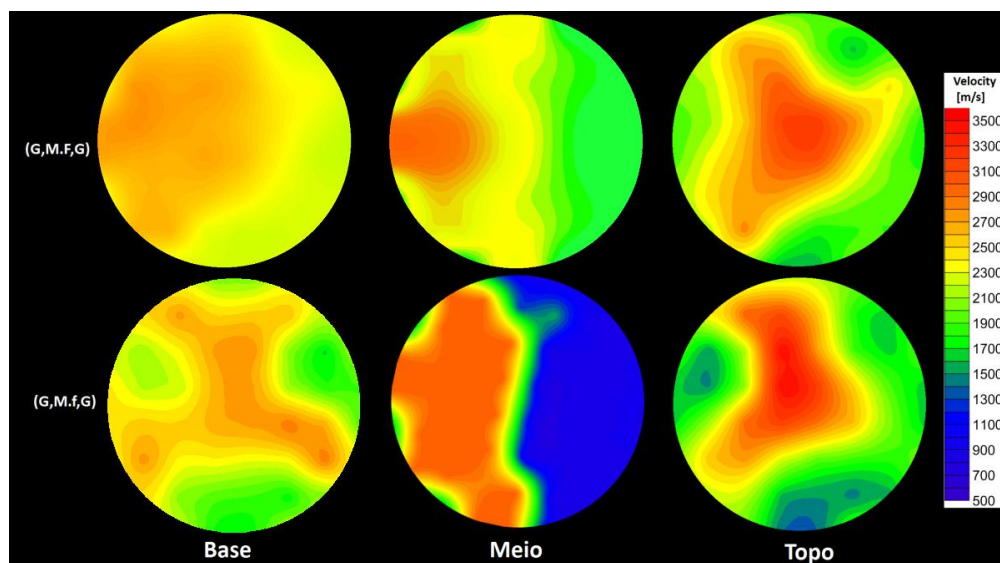


Figura 4.28 – Tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras (G,M.F,G) e (G,M.f,G)

Comparando as duas amostras é visível que os tomogramas da amostra (G,M.f,G) apresentam resultados inferiores. À semelhança do que aconteceu na amostra (G,G.f,G), destaca-se a presença de zonas azuladas nas fatias do meio e topo da amostra, representando áreas de baixas velocidades ultra-sónicas, que normalmente estão associadas a zonas com vazios, estes vazios podem ser comprovados, uma vez mais, pelas fotografias da amostra e pelo tomograma 3D do provete inteiro (Figura 4.29). De notar ainda, em relação a fatia do meio, um registo de velocidades ultra-sónicas muito elevadas do lado do meio poroso (Grosso), indicando uma boa compacidade desta zona, ou seja, o *grout* ao não conseguir penetrar o meio mais fino da camada intermédia, apenas conseguiu fluir pelo meio poroso

de maior granulometria, preenchendo por completo os vazios existentes antes da injeção. A fluidez do *grout* na fatia de topo também foi prejudicada pelo bloqueio ocorrido na fatia intermédia. No tomograma são visíveis algumas zonas azuladas representativas de um meio poroso com baixa compacidade.

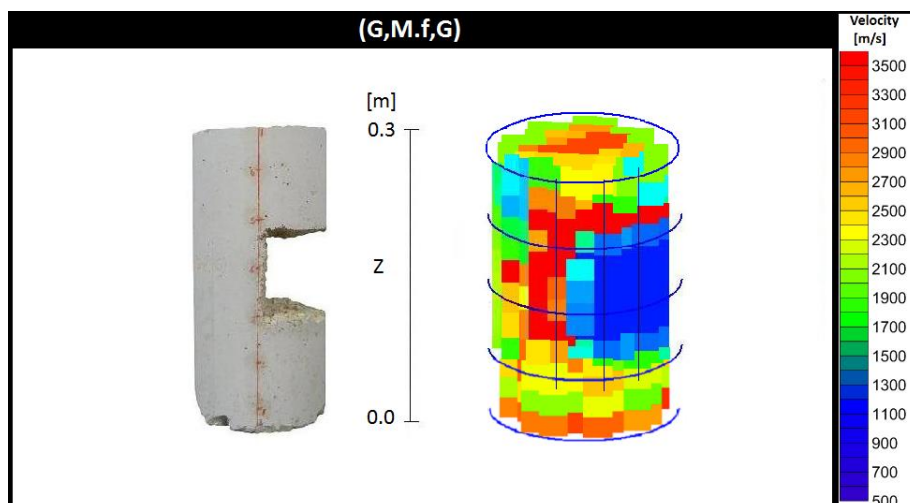


Figura 4.29 – Amostra (G,M.f,G): fotografia (esq.) e tomograma 3D (dir.) da amostra

Quanto à amostra (G,M.F,G), é possível observar novamente uma diminuição das velocidades ultra-sónicas nos tomogramas. Em relação ao tomograma referente à fatia do meio, é possível observar velocidades superiores no lado esquerdo do tomograma, lado onde se localiza o meio poroso de maior granulometria. O tomograma representativo, da fatia de topo é muito semelhante ao das amostras até aqui analisadas, onde se pode observar uma maior área de zonas correspondentes a velocidades ultra-sónicas mais baixas e uma zona mais central representativa de zonas com maior compacidade. O *grout* na parte final da injeção tem mais dificuldade em penetrar o meio nas diferentes direcções, concentrando-se mais em uma determinada zona, impedindo uma injeção mais homogénea do meio poroso.

De referir que os resultados obtidos pelos tomogramas vão de encontro aos observados nos ensaios de resistência a compressão diametral e nos ensaios ultra-sónicos.

5. MODELAÇÃO ANALÍTICA DOS ENSAIOS DE INJEÇÃO

5.1. Introdução

Na última parte deste trabalho, de modo a simular os testes de injeção realizados anteriormente em laboratório, foi usado um modelo analítico baseado em estudos efectuados por Gil e Van Rickstal [(Gil, 1995), (Van Rickstal, 2000)]. O modelo teve como ponto de partida a teoria de fluxo laminar viscoso através de meios porosos, com base na lei de Darcy (Eq. 2.1).

São ainda abordados os principais princípios de fluxo laminar através de meios porosos, assim como demonstrada a relação teórica das condições da lei de Darcy na injeção. É ainda analisado o conceito de frente de resistência e comparados os resultados obtidos, tendo como base o modelo de injeção, com os ensaios experimentais. Por fim, são feitas considerações finais acerca deste modelo de cálculo.

5.2. Princípios básicos do fluxo laminar através do meio poroso

Como já foi referido, um meio poroso é constituído por um conjunto de pequenas partículas em que os poros estão interligados entre si, formando canais de fluxo. Se o tamanho dos poros é pequeno e o gradiente de pressão é baixo, o fluxo é lento e pode ser considerado um fluxo laminar. A teoria do fluxo considera que todos os poros se encontram preenchidos, partindo do princípio que o meio está saturado. Por conseguinte, a teoria é válida apenas para meios incompressíveis. Isto significa que a porosidade não varia com a pressão à qual o líquido é submetido. Neste estudo, as injeções foram realizadas a baixas pressões, pelo que se pode considerar que a condição de incompressibilidade é facilmente respeitada.

A fim de verificar se o fluxo se encontra dentro dos limites de um escoamento laminar, o número de Reynolds (Re) é calculado para todas as fracções de meio poroso analisadas, segundo a (Eq. 5.1).

$$R_e = \frac{V \times \rho \times D}{\mu} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

Onde, R_e representa o número de Reynolds, V a velocidade efectiva [m/s], calculada com base no comportamento dos tempos obtidos experimentalmente nas injeções de grout, ρ a densidade do grout [Kg/m^3], μ a viscosidade dinâmica da água [Pa.s], e D o diâmetro das partículas do meio [m].

5.3. Validade teórica da lei de Darcy na modelação dos ensaios de injeção

Segundo Quintela (Quintela, 1981) um fluxo é considerado laminar se os valores-limite de referência do número de Reynolds estiverem compreendidos entre 1 e 10. Nestas condições, o fluxo de fluido através dos meios porosos é analiticamente regido pela lei de Darcy (Eq. 2.1). No quadro 5.1, são apresentados os valores referentes ao número de Reynolds obtidos para cada fracção de meio poroso analisada.

Quadro 5.1 – Número de Reynolds das várias fracções

Fracção [mm]	Número de Reynolds
(G) (4,75 - 9,5)	13,5
(M) (2,0 - 4,75)	7,1
(F) (1,18 - 2,36)	2,1
(f) (0,5 - 1,18)	*
(M+F) (1,18 - 4,75)	3,7
(M+f) (0,5 - 4,75)	2,2

***Não se verificou penetração do
grout**

Através do Quadro 5.1 é possível verificar que o carácter de fluxo laminar das injeções é confirmado. Apenas para a fracção 4,75-9,5 mm, o (Re) é ligeiramente superior a 10. Portanto, o fluxo de injeção dos testes experimentais pode, teoricamente, ser considerado um fluxo laminar, uma vez que os números de Reynolds, que caracterizam a natureza de fluxo, para todas as fracções de meio poroso utilizadas, estão muito abaixo da faixa que indica um fluxo turbulento.

5.4. Uso da lei de Darcy na modelação dos ensaios de injeção

Com o propósito de modelar o comportamento das injeções no tempo, (Collins,1961) interpretou a lei de Darcy como uma resultante do equilíbrio de forças no fluxo constante de fluido, com as constantes de densidade e viscosidade, dentro de uma amostra de material poroso, conforme apresentado na equação (Eq. 2.2). A lei de Darcy foi então reescrita considerando o equilíbrio destas três forças, conforme apresentado na equação (Eq. 2.3).

A fim de comparar o modelo analítico com o observado experimentalmente, os tempos de injeção, ao longo da altura das amostras, podem ser obtidos a partir das velocidades calculadas através da equação (Eq. 2.3).

5.5. Inadequação parcial da lei de Darcy na modelação dos ensaios de injeção

De seguida, na Figura 5.1, são comparados os resultados obtidos pelo método numérico e pelo método experimental através da equação (Eq. 2.3). A velocidade da injeção de *grout* foi continuamente avaliada a cada 3 cm de altura.

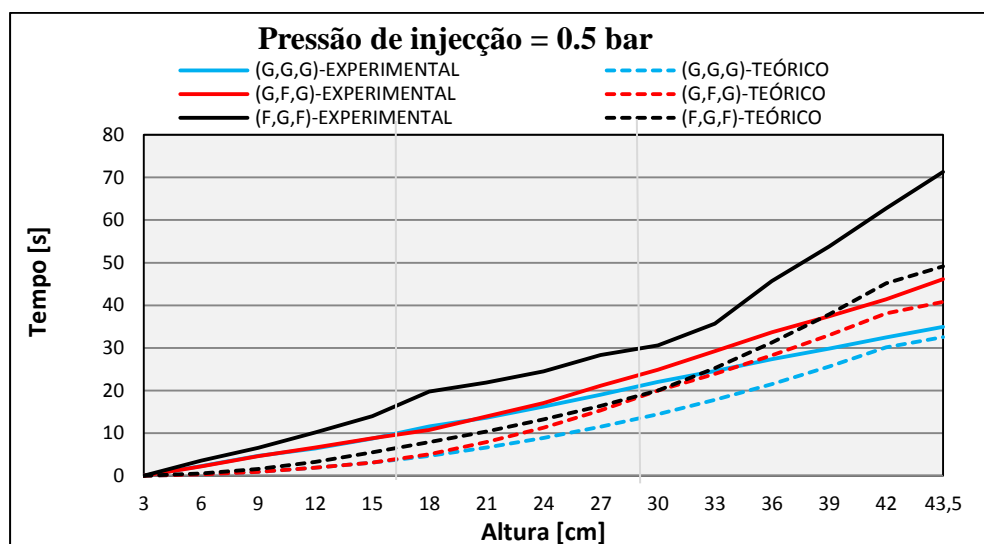


Figura 5.1 – Comportamento do fluxo de *grout* ao longo do tempo de injeção nas amostras (G,G,G), (G,F,G) e (F,G,F), tendo como base a lei de Darcy

Quando comparados os tempos de injeção, obtidos através da simulação analítica, com os valores observados nos ensaios experimentais, verificou-se uma inadequação parcial deste método. Em termos relativos, a relação entre o tempo e a altura de injeção, são quase lineares, o que se ajusta aos resultados obtidos experimentalmente. No entanto, os resultados analíticos sugerem injeções mais rápidas para todas as amostras. Começando por analisar a injeção através do cilindro preenchido com o meio poroso uniforme (G,G,G), são evidentes tempos de injeção inferiores nos primeiros dois terços da amostra, conduzindo a uma injeção mais rápida, em comparação com o que foi observado no ensaio experimental.

Com a finalidade de confirmar esta insuficiência parcial da lei de Darcy, a injeção através das amostras com meios estratificados de forma horizontal foi também simulada analiticamente. Como se pode observar o comportamento de injeção das amostras (G,F,G) e (F,G,F), tendo como base a lei de Darcy, foi semelhante ao observado na amostra uniforme. Ou seja, verificou-se igualmente tempos analíticos inferiores. No entanto, para a amostra constituída por fracções mais finas, caso da amostra (F,G,F), esta diferença nos resultados obtidos entre o método analítico e o experimental parece ser mais significativa. Uma maior fracção de partículas de granulometria fina, na constituição do meio poroso desta amostra, proporciona, como foi observado nos ensaios experimentais, uma maior

resistência ao fluxo de *grout*. Resistência que pode ser explicada pela relação entre o tamanho das partículas sólidas do *grout* e o diâmetro de canais a ser injectado. Ora tendo em conta, que o modelo analítico apenas considera a permeabilidade do meio e não propriamente uma resistência adicional ao fluxo de *grout*, pela relação já referida, é necessário ter em conta este parâmetro de modo, a diminuir as diferenças observadas entre os tempos de injeção nos ensaios experimentais e nas simulações analíticas.

Outras duas amostras são apresentadas na Figura 5.2, caso das amostras (G,M+F,G) e (G,M+f,G). Uma vez mais, é possível verificar tempos de injeção, obtidos pelo método analítico, inferiores aos observados experimentalmente. De notar ainda, que para a amostra (G,M+f,G) o modelo analítico simulou uma injeção completa do cilindro, o que não foi observado no ensaio experimental. O bloqueio do fluxo de *grout*, verificado na camada intermédia da amostra, aquando da injeção em laboratório, não foi detectado pelo modelo analítico. Mais uma vez, o modelo analítico foi incapaz de reproduzir a resistência proporcionada pelo meio ao fluxo de *grout*. Esta frente de resistência adicional vai ser analisada e explicada numa fase posterior deste estudo.

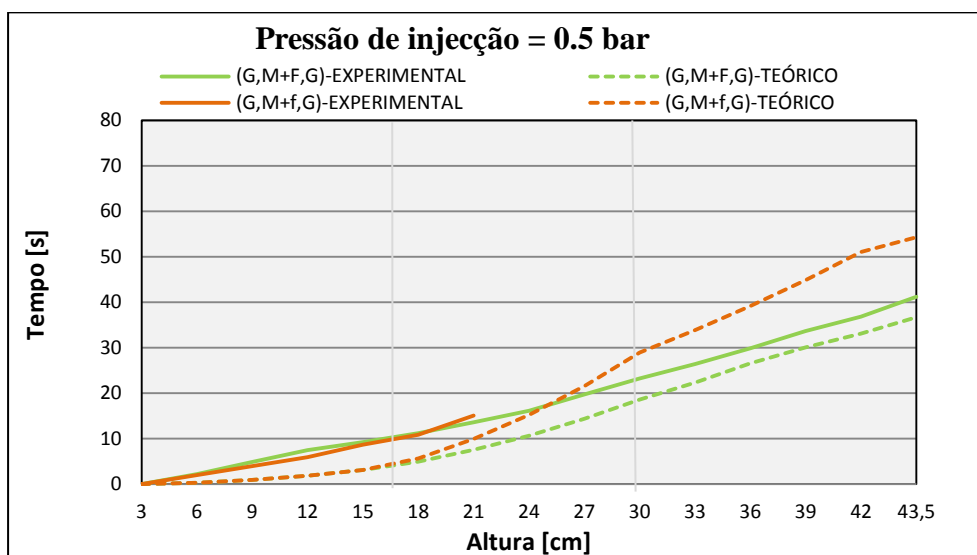


Figura 5.2 – Comportamento do fluxo de *grout* ao longo do tempo de injeção nas amostras (G,M+F,G) e (G,M+f,G), tendo como base a lei de Darcy

O comportamento do fluxo de *grout* ao longo do tempo de injeção nas amostras onde a fracção intermédia é constituída por dois meios porosos de diferentes granulometrias, divididos verticalmente, foi também analisado e encontra-se retratado na Figura 5.3 e Figura 5.4.

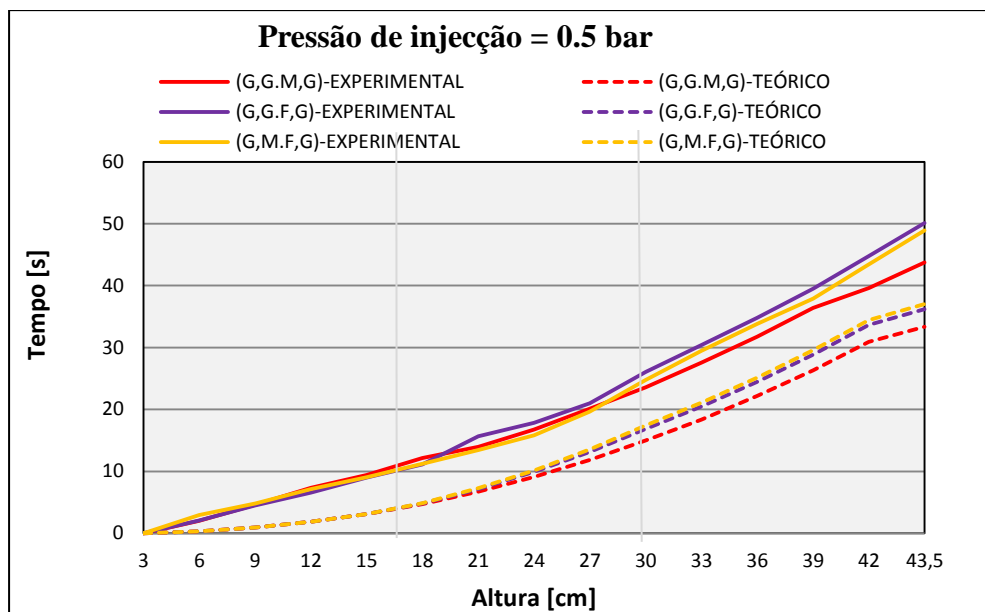


Figura 5.3 – Comportamento do fluxo de *grout* ao longo do tempo de injeção nas amostras (G,G.M,G), (G,G.F,G) e (G,M.F,G), tendo como base a lei de Darcy

Comparando os resultados analíticos com os experimentais, é possível observar novamente, através da Figura 5.3, uma simulação da injeção, por parte do modelo, mais rápida nas amostras (G,G.M,G), (G,G.F,G) e (G,M.F,G). No entanto, qualitativamente, a lei de Darcy reproduziu o comportamento de injeção, através do tempo, de uma forma satisfatória. Relativamente às amostras (G,G.f,G) e (G,M.f,G) que na camada intermédia possuem uma fracção de um meio poroso de granulometria inferior, caso do meio poroso (fino), verificou-se um maior tempo de injeção na simulação efectuada pelo modelo analítico, Figura 5.4. O modelo não foi capaz de simular de forma precisa o teste de injeção através destes meios, em particular, não foi suficientemente sensível à mudança física da permeabilidade dos meios constituintes da camada intermédia. Foi incapaz de reproduzir o bloqueio ocorrido na fracção correspondente ao meio poroso fino. Assim, o aumento significativo da velocidade, registado na camada intermédia, obtido no ensaio experimental, devido ao escoamento do *grout* se dar por uma secção menor e de elevada permeabilidade, não foi reproduzido pelo modelo analítico.

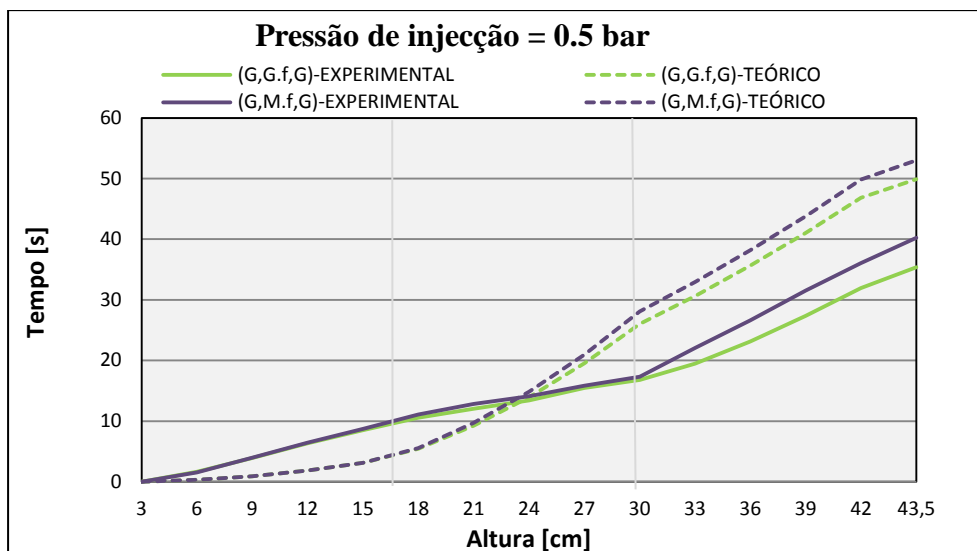


Figura 5.4 – Comportamento do fluxo de *grout* ao longo do tempo de injeção nas amostras (G,G,f,G) e (G,M,f,G), tendo como base a lei de Darcy

5.6. Teoria da frente de resistência aplicada aos ensaios de injeção

Os resultados alcançados anteriormente através do modelo analítico, tendo como a base a teoria de fluxo laminar através de meios porosos, revelaram uma injeção mais rápida, em comparação com o que tinha sido verificado experimentalmente, sugerindo que a resistência do meio é, desta forma, subestimada. A teoria da frente de resistência baseia-se na hipótese de que, para além da resistência global ao meio, existe uma resistência adicional ao fluxo do fluido. O fluido tem de romper os poros do meio filtrante, de modo que as suas partículas sólidas consigam penetrar. Uma vez que este tipo de tensão superficial é superado, o resto do escoamento do fluido, através do meio, é facilitado [(Gil, 1995), (Van Rickstal, 2000)].

Segundo Van Rickstal, a fim de aplicar, em termos analíticos, esta teoria da frente de resistência, a lei de Darcy deve ser reescrita definindo a resistência total do meio (R_{total}). A resistência total do meio (R_{total}) pode ser determinada através da análise da quantidade de *grout*, injectada ao longo do tempo de injeção, através da equação (Eq. 2.4).

Fazendo uma analogia com um arranjo de resistências em série, como o fluido tem que passar por duas resistências, a resistência total pode assim ser expressa como a soma da resistência Darcy e a frente de resistência, conforme se pode verificar através da equação (Eq. 2.5).

A partir da equação (Eq. 2.5), o valor da frente de resistência (R_{front}) pode então ser determinado para cada amostra injectada, assim como o parâmetro F, parâmetro da frente de resistência, através da equação (Eq. 2.6).

Ora como já foi referido, de acordo com a teoria da frente de resistência, existe uma resistência adicional ao fluxo do fluido, para além da resistência global ao meio. O fluido tem de romper os poros do meio filtrante. Assim as partículas sólidas do *grout* e o tamanho dos poros do meio

filtrante são influenciáveis na determinação deste factor.

Analisando os resultados obtidos para a frente de resistência (R_{front}), apresentados no Quadro 5.2, é possível observar um aumento, à medida que a permeabilidade do meio diminui (fracção mais fina).

Quadro 5.2 – Valores de frente de resistência nas amostras

Designação	RT MP seco [Pa.s/m3]	RT MP molhado [Pa.s/m3]	R darcy [Pa.s/m3]	Rfront MP seco [Pa.s/m3]	Rfront MP molhado [Pa.s/m3]	F MP seco [m]	F MP molhado [m]
(G,G,G)	1,2E+09	1,1E+09	4,7E+08	7,2E+08	6,7E+08	0,62	0,56
(G,M,G)	1,4E+09	1,3E+09	5,2E+08	8,3E+08	7,6E+08	0,64	0,59
(G,F,G)	2,1E+09	1,6E+09	5,9E+08	15,0E+08	10,0E+08	1,03	0,68
(F,G,F)	3,2E+09	2,9E+09	7,1E+08	25,0E+08	21,7E+08	1,42	1,25
(G,M+F,G)	2,1E+09	1,3E+09	5,8E+08	16,0E+08	7,6E+08	1,18	0,70
(G,M+f,G)	2,7E+09	2,3E+09	3,2E+08	24,0E+08	20,0E+08	1,40	1,23
(G,G.M,G)	1,5E+09	1,2E+09	4,9E+08	10,0E+08	7,2E+08	0,86	0,60
(G,G.F,G)	1,9E+09	1,5E+09	5,3E+08	14,0E+08	10,1E+08	1,04	0,71
(G,G.f,G)	2,5E+09	1,7E+09	7,3E+08	17,7E+08	9,7E+08	1,28	0,69
(G,M.F,G)	2,0E+09	1,6E+09	5,6E+08	14,1E+08	10,3E+08	1,07	0,73
(G,M.f,G)	2,6E+09	1,8E+09	7,7E+08	18,0E+08	10,6E+08	1,33	0,76

Outro factor a ser confirmado, pelo modelo analítico, é a menor resistência total, assim como a menor frente de resistência observada nas injeções, com os meios porosos das amostras molhados. O que de resto, corrobora as injeções realizadas em laboratório.

5.7. Considerações finais

O modelo analítico usado nos testes de injeção teve como partida a teoria do fluxo laminar através dos meios porosos, sendo a sua validade teórica demonstrada no início do capítulo. Segundo Gil e Van Rickstal [(Gil, 1995), (Van Rickstal, 2000)], a lei de Darcy pode ser reescrita de forma a modelar as injeções. As relações de permeabilidade, densidade e viscosidade foram definidas analiticamente, em função da altura de injeção. Foi observada uma inadequação parcial da lei de Darcy na modelação dos ensaios experimentais. Em termos absolutos, a simulação das injeções, com base no modelo, foi mais rápida comparativamente ao que se observou experimentalmente.

Estes resultados sugerem que a resistência global do meio foi subestimada, havendo uma resistência adicional ignorada para o fluxo de fluido.

Assim, a teoria da frente de resistência, foi implementada no modelo analítico. A resistência total foi escrita, considerando um fluxo de fluido em série. A variação da frente de resistência, em função da permeabilidade, indica que a frente de resistência aumenta, se a permeabilidade dos meios diminuir.

De salientar ainda que, o modelo não foi completamente eficaz para simular a injeção de *grout*, através de um meio onde se observou fenômenos de bloqueio do fluxo do mesmo.

6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Finalizados os diferentes estudos realizados ao longo do presente trabalho, são apresentadas um conjunto de conclusões gerais sobre os resultados obtidos.

No que respeita aos ensaios de injeção, procurou-se avaliar a penetrabilidade do *grout* ao longo de meios heterogêneos. Assim diferentes fracções constituintes do meio poroso foram dispostas de várias formas, permitindo o estudo de três tipos de casos particulares de heterogeneidade em relação ao fluxo de *grout*. Numa primeira fase procurou-se observar, de um modo mais preciso, a evolução do *grout* nos diferentes meios porosos ao longo do tempo de injeção. Foi então verificado que, para uma amostra constituída por um meio grosseiro completamente uniforme, o comportamento da curva de fluxo é quase linear, sendo os tempos de injeção do *grout* ao longo da altura da amostra semelhantes. No entanto, para uma série de amostras divididas horizontalmente em três fracções iguais, com a granulometria do meio poroso constituinte da fracção intermédia inferior às restantes, foi constatado que nem sempre o meio poroso mais permeável é o mais rápido de ser percolado. Sugerindo haver outros parâmetros envolvidos para além da permeabilidade do meio. Um desses parâmetros é o volume total a injectar. Meios mais grosseiros, embora sejam mais permeáveis também apresentam um maior volume de vazios. Ora em meios que não apresentem uma grande resistência ao fluxo, caso dos meios (Grosso) e (Médio), analisados neste estudo, um maior volume de vazios implica um maior volume a preencher por parte do *grout* e consequentemente um maior tempo de injeção.

Quanto aos meios que contenham na sua constituição fracções mais finas, esta relação entre volume total a preencher e velocidade de escoamento não se verificou. Nestes casos foi evidente um abrandamento do fluxo de *grout* ao chegar a uma zona mais densa. A velocidade de injeção diminuiu significativamente na passagem do meio poroso de maior dimensão para o meio mais fino, sendo de realçar que assim que o *grout* se depara novamente com um meio mais grosseiro, a velocidade de injeção não atinge os valores iniciais. Verificou-se ainda que para meios que contenham quantidades elevadas (50%) de partículas finas (0,5-1,18 mm), o fluxo de *grout* é interrompido prejudicando a penetrabilidade do meio poroso. A menor granulometria, assim como, a maior resistência ao fluxo de *grout* dos meios porosos constituintes por fracção finas, podem justificar os resultados obtidos.

Continuando o estudo de casos particulares de escoamentos em meios heterogêneos, foi ainda estudado o comportamento do fluxo de *grout* nas amostras em que a fracção intermédia foi dividida verticalmente com dois meios porosos de diferentes granulometrias. Nestes casos foi possível observar, nas várias injeções, que o fluxo de *grout* é controlado por a fracção mais permeável. Foi ainda possível concluir, à semelhança do que já tinha sido observado por (Van Rickstal, 2000), que

sempre que o fluxo de *grout* se depare com uma zona mais densa, originando um bloqueio do fluxo nesta fracção, a progressão do *grout* na amostra apenas é feita através da fracção mais permeável. Tendo ainda sido verificado, nestes casos, uma progressão do *grout* mais rápida na fracção intermédia, assim como um tempo total de injeção inferior às restantes amostras. O facto de a injeção se dar apenas pela fracção mais permeável na zona intermédia, pode justificar os tempos de injeção obtidos, uma vez que, uma menor área de injeção implica um menor volume de *grout* a injectar, possibilitando uma maior velocidade de injeção nesta fracção.

Com o objectivo de avaliar o efeito que o teor em água do meio poroso tem na injectabilidade do *grout*, as amostras foram previamente humedecidas por uma simples injeção de água. O pré-humedecimento dos meios permitiu injeções de *grout* mais rápidas comparativamente às amostras secas. Esta diferença de resultados obtidos para as amostras pré-humedecidas pode ser explicada considerando que a resistência ao fluxo é reduzida pela injeção de água, limpando os principais canais de escoamento, o que conduz a meios porosos com uma condutividade superior e consequentemente uma maior velocidade de injeção. É ainda importante constatar, que para as amostras pré-humedecidas que contenham na sua constituição meios porosos de granulometria mais fina, os tempos de injeção vão ter diferenças mais significativas, comparativamente às amostras secas. Uma explicação possível pode estar na maior capacidade de absorção de água destes meios quando se encontram secos, uma vez que, a inclusão de partículas finas num qualquer meio poroso conduz a que a superfície específica, destes meios, seja superior à existente em meios porosos com partículas de maiores dimensões, originando uma maior absorção de água por parte do meio poroso.

No entanto, apesar de os tempos de injeção serem inferiores em todas amostras, o pré-humedecimento não resolveu os problemas de penetrabilidade do *grout* observados nas amostras constituídas por meios de granulometria mais fina.

Numa segunda fase deste estudo, o fluxo de massa foi registado ao longo do tempo de injeção das várias amostras, tendo sido observado um aumento da massa de *grout* injectada nos meios porosos de granulometria superior, o que pode ser explicado através de um maior volume de poros por parte destes meios, bem como uma menor resistência ao fluxo, uma vez que o sistema de poros tem canais com vazios de abertura superior. De notar que quando mais fina é a fracção constituinte da camada intermédia do meio, menor a quantidade de *grout* injectada na amostra.

À semelhança das amostras secas, o fluxo de massa foi também registado ao longo do tempo de injeção nas amostras pré-humedecidas. Neste caso, registou-se uma massa inferior de *grout* injectada, o parâmetro com maior impacto é a absorção de água, por parte dos meios porosos. Ao ser absorvida mais água na fase de pré-humedecimento, fica livre um menor volume para o *grout* ser injectado. Na verdade, nestes casos, o *grout* apenas fluirá através dos espaços vazios de maior dimensão, uma vez que no momento da injeção do *grout* os vazios mais finos já estão preenchidos com água, impedindo a penetração do *grout*.

Foi ainda possível avaliar as propriedades mecânicas das amostras, injectadas com o meio

poroso seco, no estado endurecido através da realização de dois tipos de ensaios distintos, o ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons e o ensaio de resistência à tracção por compressão diametral (*Splitting Tensile Strength Test*).

No que diz respeito a velocidades ultra-sónicas, no geral foram representativas de meios com boa compacidade, o que de resto foi comprovado após o corte dos cilindros. Ainda assim, e tendo em conta que neste tipo de ensaio a velocidade de propagação de ultra-sons é tanto maior quanto mais denso for o conjunto *grout*/meio poroso, foi possível concluir que meios porosos que contenham na sua composição partículas finas, proporcionam menores velocidades de propagação. Estes resultados podem ser justificados tendo em conta que quanto menor a granulometria do meio, maior a tendência para a existência de bloqueios à passagem do *grout*, resultando em meios com menor compacidade e consequentemente proporcionando piores condições de propagação da onda ultra-sónica. Outra explicação possível, é que um meio que possui partículas finas na sua composição tem uma maior quantidade de interfaces agregado-*grout* e, consequente, uma maior quantidade de perdas de energia por dispersão, o que proporciona, também, a existência de menores velocidades de propagação.

Relativamente aos resultados obtidos no ensaio de resistência à tracção por compressão diametral, em geral foi possível observar uma relação directa com os ensaios ultra-sónicos. Tendo em conta que este ensaio depende não só da compacidade mas também das ligações mecânicas e químicas que se estabelecem entre o *grout* e o meio poroso, foi possível observar novamente que as fracções de granulometria fina surgem associadas a baixos valores de resistências mecânicas. A menor injectabilidade do *grout* observada para estes meios porosos, traduz-se numa menor capacidade de penetração dos vazios, prejudicando as ligações entre o *grout* e as partículas do meio poroso, o que pode estar na origem destes resultados, resultante de uma transferência de tensões menos eficiente na interface *grout*/meio poroso.

A análise do estado interior das amostras foi, ainda, complementada com recurso à técnica de tomografia ultra-sónica. Comparando os resultados obtidos para os vários meios porosos, foi notório que os meios que não continham, na sua constituição, fracções de granulometria fina apresentaram melhores resultados. Ou seja, os tomogramas estão em consonância com os resultados obtidos no ensaio ultra-sónico e nos ensaios mecânicos. Como já foi referido, uma granulometria fina, aumenta a probabilidade da ocorrência de fenómenos de filtração e de bloqueios à passagem de *grout*. Ora, vazios não preenchidos presentes no meio, origina amostras com menor compacidade, proporcionando a obtenção de zonas com menores valores de velocidades ultra-sónicas, representadas nos tomogramas por cores azuladas. É ainda importante realçar que os tomogramas ultra-sónicos obtidos ilustram a realidade do estado interior das amostras, quer em imagens em 2D, como em 3D. Provando ser bastante precisos e úteis, principalmente na detecção de vazios.

Por fim, na última parte deste trabalho, de modo a simular os testes de injeção realizados anteriormente em laboratório, foi usado um modelo analítico tendo como ponto de partida a teoria de fluxo laminar viscoso através de meios porosos, com base na lei de Darcy. Quando comparados os

tempos de injeção, obtidos através da simulação analítica, com os valores observados nos ensaios experimentais, verificou-se uma inadequação parcial deste método. Em termos relativos, a relação entre o tempo e a altura de injeção, são quase lineares, o que se ajusta aos resultados obtidos experimentalmente. No entanto, em termos absolutos, a simulação das injeções, com base no modelo, foi mais rápida comparativamente ao que se observou experimentalmente. O modelo foi ainda incapaz de prever os fenómenos de bloqueios ao fluxo de *grout*, verificados nos meios de fracção mais fina durante os ensaios experimentais. Estes resultados sugerem que a resistência global do meio foi subestimada, havendo uma resistência adicional ignorada. A teoria da frente de resistência baseia-se na hipótese de que, para além da resistência global ao meio, existe uma resistência adicional ao fluxo do fluido. O fluido tem de romper os poros do meio filtrante, de modo que as suas partículas sólidas consigam penetrar. Uma vez que este tipo de tensão superficial é superado, o resto do escoamento do fluido, através do meio, é facilitado [(Gil, 1995), (Van Rickstal, 2000)]. Foi ainda possível observar, um aumento da frente de resistência (R_{front}), à medida que a permeabilidade do meio diminui (meios com fracção mais fina). Este aumento da frente de resistência, pode ser justificado com a relação entre a dimensão das partículas sólidas do ligante e a abertura do sistema de poros dos canais de vazios destes meios.

Por fim, como desenvolvimentos futuros, seria interessante procurar avaliar a penetração do *grout* em meios com características diferentes, nomeadamente calcário e tijolo. Outra sugestão era procurar avaliar novos tipos de disposição das fracções constituintes do meio poroso, sendo ainda importante procurar resolver os problemas de injectabilidade verificados neste estudo, nomeadamente alterando a constituição do *grout*. Como foi observado para meios que contenham quantidades elevadas (50%) de partículas finas (0,15-2 mm), o fluxo de *grout* é interrompido, ora um *grout* que contenha na sua constituição partículas sólidas de dimensão mais fina pode resolver o problema da injectabilidade. No entanto, partículas mais finas possuem maior superfície específica, sendo necessária ajustar a relação água/ligante e a quantidade de superplastificante.

BIBLIOGRAFIA

- Aiad, I. - *Influence of time addition of superplasticizers on the rheological properties of fresh cement pastes*. Cement and Concrete Research, 2003.
- American Society for Testing and Materials, (ASTM) - *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. C 597-02, United States, ASTM, 2004.
- American Society for Testing and Materials, (ASTM) - *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete*. C496/496M-04, United States, ASTM, 2004.
- Anzani, A.; Binda, L.; Lualdi, M.; Tedeschi, C.; Zanzi, L. - *Use of Sonic and GPR Tests to Control the Effectiveness of Grout Injections of Stone Masonry*. ECNDT 2006, Volume 3, págs. 1–7, 2006.
- Assaad, J.; Daou, Y. - *Cementitious grouts with adapted rheological properties for injection by vacuum techniques*. Cement and Concrete Research, Volume 59, págs. 43–54, 2014.
- Baltazar, L.; Henriques, F. - *Rheology of Grouts for Masonry Injection*. Key Engineering Materials, Volume 624, págs. 283–290, 2015.
- Baltazar, L.; Henriques, F.; Cidade, M. - *Contribution to the design of hydraulic lime-based grouts for masonry consolidation*. Journal of Civil Engineering and Management, 2015a.
- Baltazar, L.; Henriques, F.; Jorne, F. - *Optimisation of flow behaviour and stability of superplasticized fresh hydraulic lime grouts through design of experiments*. Construction and Building Materials, Volume 35, págs. 838–845, 2012b.
- Baltazar, L.; Henriques, F.; Jorne, F.; Cidade, M. - *The use of rheology in the study of the composition effects on the fresh behaviour of hydraulic lime grouts for injection of masonry walls*. Rheologica Acta, Volume 52, págs. 127–138, 2013a.
- Baltazar, L.; Henriques, F.; Jorne, F.; Cidade, M. - *Performance improvement of hydraulic lime based grouts for masonry consolidation: an experimental study*. 13th International Conference on Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture, New Forest, UK, 25th-27th June, págs. 417–430, 2013b.
- Biçer-Şimşir, B.; Griffin, I.; Palazzo-Bertholon, B.; Rainer, L. - *Lime-based injection grouts for the conservation of architectural surfaces*, Reviews in Conservation, number 10, págs. 3–17, 2009.
- Binda, L.; Baronio, G.; Tiraboschi, C.; Tedeschi, C. - *Experimental research for the choice of adequate materials for the reconstruction of the Cathedral of Noto*. Construction and Building Materials, Volume 17, págs. 629–639, 2003.
- Binda, L.; Lualdi, M.; Saisi, A. - *Non-Destructive Testing Techniques Applied for Diagnostic Investigation: Syracuse Cathedral in Sicily, Italy*. International Journal of Architectural Heritage, Volume 1, págs. 380–402, 2007.
- Binda, L.; Modena, C.; Baronio, G.; Abbaneo, S. - *Repair and investigation techniques for stone masonry walls*. Construction and Building Materials, Volume 11, págs. 133–142, 1997.

- Binda, L.; Saisi, A. - *Knowledge of the building, on site investigation and connected problems. Eurocode 8 Perspectives from Italian Standpoint Workshop* págs. 213–224, 2009.
- Binda, L.; Saisi, A.; Tiraboschi, C. - *Application of sonic tests to the diagnosis of damaged and repaired structures. NDT E International*, Volume 34, págs. 123–138, 2001.
- Binda, L.; Saisi, A.; Zanzi, L. - *Sonic tomography and flat-jack tests as complementary investigation procedures for the stone pillars of the temple of S. Nicolò l'Arena (Italy). NDT E International*, Volume 36, págs. 215–227, 2003b.
- Bjornstrom, J.; Chandra, S. - *Effect of superplasticizers on the rheological properties of cements. Materials and Structures*, Volume 36, págs. 685–692, 2003.
- Brás, A. - *Grout optimization for masonry consolidation. Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.*
- Brás, A.; Henriques, F. - *Natural hydraulic lime based grouts – The selection of grout injection parameters for masonry consolidation. Construction and Building Materials*, Volume 26, págs. 135–144, 2012.
- Brás, A.; Henriques, F.; Cidade, M. - *Rheological behaviour of hydraulic lime-based grouts. Shear-time and temperature dependence. Mechanics of Time-Dependent Materials*, Volume 17, págs. 223–242, 2012.
- Buyukozturk, O. - *Imaging of concrete structures. NDT E International*, Volume 31, págs. 233–243, 1998.
- Cantini, L.; Felicetti, R.; Zanzi, L.; Munda, S.; Meana, M.; Binda, L. - *Sonic tomography applied to historic masonry structures: validation of the testing methodology and of the data elaboration by different computer codes. Proc14th International Conference – Structural faults repair, Scotland, 3rd–5th July, 2012.*
- Coelho, J. - *Avaliação da injeção de grouts em alvenarias antigas com ensaios não destrutivos. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2013.*
- Concu, G.; De Nicolo, B.; Piga, C.; Popescu, V. - *Measurement system for non-destructive testing using ultrasonic tomography spectral attenuation. 12th International conference on optimization of electrical and electronic equipment (OPTIM), 20th–22th May. págs. 1016–1020, 2010a.*
- Concu, G.; De Nicolo, B.; Piga, C.; Popescu, V. - *Non-Destructive Testing of Stone Masonry using Acoustic Attenuation Tomography Imaging. 12th International conference on optimization of electrical and electronic equipment (OPTIM), 20th–22th May, 2010b.*
- Flatt, R.; Houst, Y. - *A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers. Cement and Concrete Research*, Volume 31, págs. 1169 – 1176, 2001.
- Gil, N.P. - *GROUTING as a repair and strengthening technique to historic masonry buildings. Doctoral Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 1995.*
- Guerreiro, J. - *Avaliação do efeito combinado de temperatura, tempo de repouso e pressão de injeção na eficiência de injeção de grouts. Dissertação para obtenção do grau Mestre em*

- Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.
- Hanehara, S.; Yamada, K. - *Rheology and early age properties of cement systems*. Cement and Concrete Research, Volume 38, págs. 175 – 195, 2008.
- Hunter, R. -. *Foundations of colloid science*. 2nd ed. New York: Oxford University Press Inc, 2001.
- Ignoul, S.; Van Rickstal, F.; Van Gemert, D. -. *Application of mineral grouts. Case study and impact on structural behaviour: Church of St. Catharina at Duisburg (B)*. Structural Analysis of Historical Constructions, A.A. Balkema Publishers, Leiden, 2005.
- Jorne, F.; Henriques, F.; Baltazar, L. - *Grout injection in porous media with different internal structures*. 14th International Conference - Structural Faults & Repair, Edinburgh, 3rd-5th July, 2012a.
- Jorne, F.; Henriques, F.; Baltazar, L. - *Avaliação da técnica de injeção de grout recorrendo ao ensaio de ultra-sons e tomografia ultra-sónica*. Congresso Construção 2012, Coimbra, 18-20 Dezembro, 2012b.
- Jorne, F.; Henriques, F.; Baltazar, L. - *Evaluation of consolidation of grout injection with ultrasonic tomography*. Construction and Building Materials, Volume 66, págs. 494–506, 2014.
- Jorne, F.; Henriques, F.; Baltazar, L. - *Evaluation of consolidation of different porous media with hydraulic lime grout injection*. Journal of Cultural Heritage, Volume 16, págs. 438-451, 2015a.
- Jorne, F.; Henriques, F.; Baltazar, L. - *Injection capacity of hydraulic lime grouts in different porous media*. Materials and Structures, Volume 48, págs. 2211-2233, 2015b.
- Jorne, F.; Henriques, F.M. a; Baltazar, L.G. -. *Influence of superplasticizer, temperature , resting time and injection pressure on hydraulic lime grout injectability . Correlation analysis between fresh grout parameters and grout injectability*. J. Build. Eng., Volume 4, págs. 140–151, 2015c.
- Kalagri, A.; Miltiadou-Fezans, A.; Vintzileou, E. - *Design and evaluation of hydraulic lime grouts for the strengthening of stone masonry historic structures*. Materials and Structures, Volume 43, págs. 1135–1146, 2010.
- Luso, E. - *Análise experimental de caldas à base de cal para injeção de alvenaria antiga*. Tese de doutoramento em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Braga, 2012.
- Matos, J. - *Efeito da temperatura no comportamento de caldas de injeção à base de cal hidráulica natural na presença de policarboxilato*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.
- Miltiadou-Fezans, A.; Tassios, T. - *Fluidity of hydraulic grouts for masonry strengthening*. Materials and Structures, Volume 45, págs. 1817–1828, 2012.
- Rosquoët, F.; Alexis, A.; Khedlidj, A.; Phelipot, A. - *Experimental study of cement grout*. Cement and Concrete Research, 2003.

- Roussel, N. - *Rheology of fresh concrete : from measurements to predictions of casting processes*. Materials and Structures, Volume 40, págs. 1001–1012, 2007.
- Roussel, N.; Lemaître, A.; Flatt, R.; Coussot, P. - *Steady state flow of cement suspensions: A micromechanical state of the art..* Cement and Concrete Research, Volume 40, págs. 77 – 84, 2010.
- Schullerl, M.; Atkinson, R.; Berra, M.; Binda, L. - *Acoustic tomography for evaluation of unreinforced masonry*. Construction and Building Materials, Volume 11, págs. 199–204, 1997.
- Teixeira, M. - *Estudo reológico de caldas hidráulicas para utilização na reabilitação do edificado*. Dissertação para obtenção do grau Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.
- Telha, F. - *Análise da influência da alteração do ângulo de contacto na injectabilidade de grouts*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2015.
- Toumbakari, E. - *Lime-pozzolan-cement grouts and their structural effects on composite masonry walls*, 2002.
- Toumbakari, E.; Van Gemert, D.; Tassios, T.; Vintzileou, E. - *Experimental investigation and analytical modeling of the effect of injection grouts on the structural behaviour of three-leaf masonry walls*. Structural Analysis of Historical Constructions, 2005.
- Valluzzi, M. - *Comportamento Meccanico de Murature Consolidate Com Materiali e Technique a Base di Calce*, Doctoral Thesis, University of Padua (IT), 2000.
- Valluzzi, M. - *Requirements for the choice of mortar and grouts for consolidation of three-leaf stone masonry walls*. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, 2005.
- Van Rickstal, F. - *Grout Injection of Masonry, scientific approach and modeling*. Doctoral Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 2000.
- Van Rickstal, F.; Toumbakari, E.; Ignoul, S.; Van Gemert, D. - *Development of mineral grouts for consolidation injection*. In Consolidation of Masonry, Ed. D. Van Gemert, Advances in Materials Science and Restoration. págs. 61–70, 2003.
- Vikan, H. - *Rheology and reactivity of cementitious binders with plasticizers*, Doctoral Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2005.
- Vintzileou, E. - *Grouting of Three-Leaf Stone Masonry: Types of Grouts, Mechanical properties of Masonry before and after Grouting*. Structural Analysis of Historical Constructions, 2006.
- Yamada, K.; Takahashi, T.; Hanehara, S.; Matsuhisa, M. - *Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer*. Cement and Concrete Research, Volume 30, págs. 197–207, 2000.